



TESIS-TL 142501

**STUDI PENGARUH RASIO Si/Al TERHADAP SIFAT
FISIK-MEKANIK SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS
TERAK FERONIKEL**

MUSTOFA
NRP. 2714201008

DOSEN PEMBIMBING
Sungging Pintowantoro, ST., M.T., Ph.D

PROGRAM MAGISTER
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



THESIS-TL 142501

**THE EFFECT OF Si/Al RATIO TO PHYSICAL-
MECHANICAL PROPERTIES OF FERRONICKEL
SLAG-BASED GEOPOLYMER CEMENT: A STUDY**

MUSTOFA

Student ID No. 2714201008

ADVISOR

Sungging Pintowantoro, ST., M.T., Ph.D

MASTER PROGRAM

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Mustofa

NRP. 2714201008

Tanggal Ujian: 21 Juli 2016

Periode Wisuda: Semester Genap 2015/2016

Disetujui oleh:

1. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D
NIP: 19680930 200003 1 001

(Pembimbing)

2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng
NIP: 19760528 200212 1 003

(Penguji)

3. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP: 19761027 200312 1 001

(Penguji)

4. Dr. Ing. Victor Yuardi R, S.T., M.Sc
NIP: -

(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D
NIP: 19601202 198701 1 001

STUDI PENGARUH RASIO Si/Al TERHADAP SIFAT FISIK-MEKANIK SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS TERAK FERONIKEL

Nama Mahasiswa : Mustofa
NRP : 2714201008
Pembimbing : Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRAK

Geopolimer merupakan material aluminosilikat padat dan stabil yang dibentuk oleh hidroksida alkali atau aktivasi silikat alkali dari prekursor yang biasanya diberikan sebagai serbuk padat melalui proses geopolimerisasi. Sumber utama bahan geopolimer merupakan bahan-bahan yang memiliki komponen silika dan alumina, salah satunya adalah terak feronikel. Proses geopolimerisasi secara substansial melibatkan reaksi kimia yang cepat dalam kondisi basa pada mineral Si-Al yang menghasilkan tiga dimensi rantai polimer dan struktur cincin yang terdiri dari obligasi Si-O-Al-O. Pada penelitian ini, proses pembuatan semen geopolimer terbagi dalam empat proses. Pertama, mencampurkan serbuk terak feronikel dengan aluminium hidroksida untuk memenuhi rasio Si/Al yang ditentukan. Kedua, mencampurkannya dengan larutan aktivator dengan rasio S/L adalah 5,4 gr/mL untuk membentuk pasta. Ketiga, pasta dicetak dalam cetakan kubus dengan dimensi 5x5x5 cm³ dan dipanaskan dalam oven pada suhu 80 °C selama 24 jam. Akhirnya, spesimen dibiarkan pada suhu ruang untuk pengerasan lebih lanjut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan menurunnya penyerapan air dan meningkatnya kuat tekan dengan meningkatnya rasio Si/Al. Hal ini karena meningkatnya rasio Si/Al mengarah pada pembentukan geopolimer yang lebih homogen. Kondisi optimum dicapai ketika semen geopolimer memiliki kuat tekan tinggi dan penyerapan air rendah yaitu pada rasio Si/Al = 3,5, dimana kuat tekan dan penyerapan air (setelah 24 jam perendaman) masing-masing adalah 12,6 MPa dan 81,7 gr/100 cm².

Kata kunci: sifat fisik-mekanik, semen geopolimer, terak feronikel

~halaman ini sengaja dikosongkan~

THE EFFECT OF Si/Al RATIO TO PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF FERRONICKEL SLAG-BASED GEOPOLYMER CEMENT: A STUDY

Student Name : Mustofa
NRP : 2714201008
Supervisor : Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRACT

Geopolymer is a solid and stable aluminosilicate material formed by alkali hydroxide or alkali silicate activation of the precursors is normally given as a solid powder through geopolymerization reaction. The main sources of geopolymer material are materials that have a component of silica and alumina, one of which is the ferronickel slag. Geopolymerization reaction substantially involves the rapid chemical reaction in alkaline conditions of mineral Si-Al that produces three-dimensional polymer chain and ring structure consisting of a bond Si-O-Al-O. In this study, manufacturing process of geopolymer cement consists in four stages. First, ferronickel slag powder mixed with aluminum hydroxide with specified Si/Al ratio. Second, mixed it with the activator solution with the S/L ratio is 5,4 g/mL to form the paste. Third, pasta molded in the cube mold with dimensions of 5x5x5 cm³ and cured in an oven at a temperature of 80 °C for 24 hours. Finally, the specimens were left at room temperature for further hardening. The results showed that there was a tendency to decrease water absorption and increase compressive strength with increasing Si/Al ratio. This is due to the increased of Si/Al ratio leads to the formation of a more homogeneous geopolymer. The optimum condition is achieved when the geopolymer cement has a high compressive strength and low water absorption is at a ratio of Si/Al = 3.5, where the compressive strength and water absorption (after 24 hours of immersion) was 12.6 MPa and 81.7 g/100 cm², respectively.

Keywords: physical-mechanical properties, geopolymer cement, ferronickel slag.

~halaman ini sengaja dikosongkan~

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Terak (<i>slag</i>) Nikel	9
2.2.1 Pengertian	9
2.2.2 Komposisi Kimia	10
2.2.3 Jenis-jenis Terak	11
2.2.4 Diagram Fase Terak	11
2.2.4.1 Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	11
2.2.4.2 Sistem $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	12
2.2.4.3 Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$	13
2.2.5 Aplikasi dan Penggunaan Terak Nikel	14
2.2.5.1 Terak Nikel sebagai Agregat pada Pembuatan Beton	16
2.2.5.2 Terak sebagai Campuran Semen Portland	16
2.2.5.3 Terak sebagai Material Geopolimer	17
2.3 Semen	18

2.3.1	Pengertian	18
2.3.2	Tipe-tipe Semen	18
2.4	Material Geopolimer	20
2.4.1	Pengertian	20
2.4.2	Proses Sintesis	21
2.4.3	Mekanisme Geopolimerisasi	23
2.4.4	Sifat dan Karakteristik Geopolimer	27
2.4.5	Aplikasi Geopolimer	29
2.5	Larutan Aktivator	31
2.5.1	Natrium Hidroksida	34
2.5.2	Natrium Silikat	35
BAB 3 METODE PENELITIAN		39
3.1.	Bahan dan Alat	39
3.1.1	Bahan.....	39
3.1.2	Alat-alat	39
3.2	Diagram Alir	40
3.3	Prosedur Penelitian	41
3.3.1	Penghancuran Material	41
3.3.2	Pembuatan Larutan Aktivator	41
3.3.3	Sintesis Semen Geopolimer	42
3.4	Pengujian	42
3.4.1	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	42
3.4.2	<i>Fourier Transform InfraRed</i> (FTIR)	44
3.4.3	<i>Scanning Microscope Electron</i> (SEM)	46
3.4.4	Penyerapan Air (<i>Water Absorption</i>)	46
3.4.5	Pengujian Kuat Tekan (<i>Compressive Strength</i>)	48
3.5	Perancangan Penelitian dan Pengujian	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Hasil Pengujian	51
4.1.1	Hasil Pengujian XRD Terak Feronikel	51
4.1.2	Hasil Pengujian EDX Terak Feronikel	54
4.1.3	Hasil Pengujian FTIR Terak Feronikel	56

4.1.4 Hasil Pengujian Penyerapan Air Semen Geopolimer	57
4.1.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Semen Geopolimer	58
4.2 Pembahasan	59
4.2.1 Analisis <i>X-Ray Diffraction</i>	59
4.2.2 Analisis FTIR Semen Geopolimer	61
4.2.3 Penyerapan Air Semen Geopolimer	66
4.2.4 Kuat Tekan Semen Geopolimer	68
4.2.5 Analisis SEM Semen Geopolimer	73
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran	77
DAFTAR PUSTAKA	

~halaman ini sengaja dikosongkan~

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Fitur Mikrostruktur Sampel Geopolimer yang Diperoleh Menggunakan SEM-EDS	8
Tabel 2.2	Hasil Utama – Feronikel Smelting – Lapisan Bijih Utama.....	10
Tabel 2.3	Komposisi Kimia Terak (Diadopsi dari Berbagai Sumber).....	10
Tabel 2.4	Perbandingan Komposisi Kimia antara <i>Ferronickel Slag</i> (FNS) dan <i>Fly Ash</i> (FA) (Pustaka)	11
Tabel 2.5	Tipe-tipe Semen Portland	18
Tabel 2.6	Tipe-tipe Semen (non-Portland) dan Penggunaannya	19
Tabel 2.7	Perbandingan antara Binder OPC (<i>Ordinary Portland Cement</i>), MPCs (<i>Magnesium Phosphat Cements</i>), dan Geopolimer	27
Tabel 2.8	Aplikasi-aplikasi Geopolimer Berdasarkan Rasio Si/Al	31
Tabel 3.1	Perancangan Penelitian dan Jumlah Spesimen	49
Tabel 3.2	Pengujian Mikrostruktur dan Sifat Fisik-Mekanik	49
Tabel 4.1	Komposisi Mineral dalam Terak Feronikel	52
Tabel 4.2	Komposisi Kimia Terak Feronikel	54
Tabel 4.3	Komposisi Oksida Terak Feronikel	55
Tabel 4.4	Kebutuhan Al(OH)_3 yang Ditambahkan	56
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Penyerapan Air (dalam gram/100 cm^2)	58
Tabel 4.6	Hasil Pengujian Kuat Tekan Setelah 28 Hari	58
Tabel 4.7	Hasil Perhitungan Standar Deviasi Kuat Tekan	59
Tabel 4.8	Komposisi Mineral dalam Produk Geopolimer	60

~halaman ini sengaja dikosongkan~

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Terak Feronikel	9
Gambar 2.2	Diagram Fase Terak Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	12
Gambar 2.3	Diagram fase Terak Sistem $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$	13
Gambar 2.4	Diagram Fase Terak Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (10%)	14
Gambar 2.5	Keseluruhan Proses Pemanfaatan Terak dalam Konstruksi Jalan Raya	15
Gambar 2.6	Hubungan Pemanfaatan Terak dalam Konstruksi Jalan Raya	15
Gambar 2.7	Kelas Khas Pemanfaatan Terak dalam Konstruksi Jalan Raya	16
Gambar 2.8	Proses Produksi Geopolimer	21
Gambar 2.9	Struktur Geopolimer Berdasarkan Perbandingan Si dan Al	22
Gambar 2.10	Grafis Molekul Komputer dari Polimer $\text{M}_n\text{-(-Si-O-Al-O-)}_n$ poly(sialate) and $\text{M}_n\text{-(-Si-O-Al-O-Si-O-)}_n$ poly(sialate-siloxo), dan Ikatan Kerangkanya	22
Gambar 2.11	Model Konseptual Proses Geopolimerisasi	24
Gambar 2.12	Skema Kinetika Sintesis Geopolimer dengan Aktivasi NaOH dari Metakaolin	26
Gambar 2.13	Perkiraan kenaikan atau penurunan biaya produksi untuk bahan bangunan, karena direncanakan Eco-pajak atas Energy atau emisi CO_2 yang sebenarnya (energi + Kimia CO_2).....	30
Gambar 2.14	Mekanisme Aktivasi Alkali dari Abu Layang	32
Gambar 2.15	Kuat Tekan Geopolimer dengan Perbedaan Komposisi Material Penyusunnya	33
Gambar 2.16	Hubungan Kuat Tekan Geopolimer dengan Konsentrasi SiO_2	33
Gambar 2.17	Abu Layang yang Diaktivasi dengan (a) 8 M Larutan NaOH; (b) Campuran Larutan NaOH + Natrium Silikat	34
Gambar 2.18	Hubungan Antara Kuat Tekan dengan Konsentrasi NaOH	35
Gambar 2.19	Hasil SEM dari Gel Natrium Silikat dengan Rasio Molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 5$	36
Gambar 2.20	XRD Pasta Geopolimer dengan NHNS	36
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	41
Gambar 3.2	Mekanisme Pengujian Sampel dalam Geometri Bragg-Brentano	43
Gambar 3.3	Alat Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	44

Gambar 3.4	Diagram optik dari Interferometer Michelson	45
Gambar 3.5	Vibrasi <i>Stretcing</i> dan <i>Bending</i>	45
Gambar 3.6	Prinsip Kerja <i>Scanning Microscope Electron</i> (SEM)	46
Gambar 3.7	Konfigurasi Spesimen Selama Pengujian Penyerapan Air	47
Gambar 3.8	Alat Uji Tekan dan Spesimen Benda Uji	48
Gambar 4.1	Pola XRD Terak Feronikel	52
Gambar 4.2	Diagram Turner <i>Wo-En-Fs</i> Komposisi <i>Diopside</i> (hijau), <i>Augite</i> (merah), and <i>Orthopyroxene</i> (biru).....	53
Gambar 4.3	Spektrum FTIR Terak Feronikel	57
Gambar 4.4	Pola XRD Semen Geopolimer dengan Perbedaan Rasio Si/Al	60
Gambar 4.5	Spektra FTIR Geopolimer dengan Perbedaan Rasio Si/Al pada Rentang Panjang Gelombang 400-4000 cm ⁻¹	62
Gambar 4.6	Substitusi Atom Si oleh Al	64
Gambar 4.7	Proses Transfer Ion Na ⁺ sebagai Kation dalam Struktur Si-O-Al	65
Gambar 4.8	Struktur Tiga Dimensi dengan Atom Na (biru) sebagai Kation Penyeimbang Atom Al (ungu); O (merah) dan Si (kuning) untuk Rasio Si/Al = 2	65
Gambar 4.9	Distribusi Penyerapan Air Semen Geopolimer	67
Gambar 4.10	Nilai Kuat Tekan Semen Geopolimer versus Rasio Si/Al	69
Gambar 4.11	Diagram Spesiasi Si dalam Larutan	71
Gambar 4.12	Hubungan Penyerapan Air (setelah 24 jam) dengan Kuat Tekan	73
Gambar 4.13	Mikrostruktur Semen Geopolimer dengan Rasio Si/Al = 1,5 (a) dan 2,5 (b) untuk Perbesaran 100x	74
Gambar 4.14	Mikrostruktur Semen Geopolimer pada Permukaan Rongga dengan Rasio Si/Al = 1,5 (a) dan 2,5 (b) untuk Perbesaran 1000x	74
Gambar 4.15	Mikrostruktur Geopolimer dengan Rasio Si/Al = 1,5 (a) dan 2,5 (b) untuk Perbesaran 5000x	75

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sumber daya nikel Indonesia diperkirakan mencapai 2.633 juta ton ore dengan cadangan sebesar 577 juta ton ore yang tersebar di Sulawesi, Kalimantan, Maluku dan Papua dengan kandungan unsur nikel rata-rata 1,45%. Sebagian dari potensi sumber daya tersebut sudah ditambang dan diekspor dalam bentuk *nickel matte* oleh PT. Inco Indonesia dan *ferronickel* oleh PT. Antam ataupun dalam bentuk bijih nikel tanpa melalui proses pengolahan dan pemurnian yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan yang banyak bertumbuhan dalam dasawarsa terakhir (Kementerian ESDM, 2012). Selain kedua perusahaan tersebut, terdapat beberapa aktivitas pertambangan tradisional yang langsung menjual bijih nikel untuk di ekspor ke Jepang, China, maupun Korea, seperti di Pulau Sulawesi dan Halmahera (Biro Perencanaan Kementerian Perindustrian, 2012).

Berbagai kebijakan telah dilakukan oleh pemerintah Indonesia dalam kaitannya dengan proses pengolahan dan pemurnian logam dari bijihnya. Untuk keperluan tersebut, pemerintah menginginkan berbagai investor dan pabrik pengolahan mineral untuk membangun *smelter* nikel. Pada tahun 2012, PT. Antam telah beroperasi dengan 3 unit *smelter* di Pomalaa sedangkan PT. VALE (PT. Inco) telah beroperasi dengan 3 unit *smelter* di Kabupaten Luwu Timur dengan mengolah bijih nikel masing-masing sebesar 2,95 dan 6,08 juta ton (Biro Perencanaan Kementerian Perindustrian, 2012).

Menurut Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara (2016), pada tahun 2015 terdapat 5 perusahaan pembangun *smelter* pengolahan nikel yang telah beroperasi, yaitu PT. Gebe Industry Nikel, PT. Fajar Bhakti Lintas Nusantara, PT. Aneka Tambang, PT. Sulawesi Mining Investmen, dan PT. Bintang Timur Steel dengan total kapasitas input yang diolah sebesar 5.888.000 ton per tahun. Pada tahun 2016 terdapat 2 perusahaan pembangun *smelter* yaitu PT. Macika Mineral Industri dan PT. First Pasific Mining dengan total kapasitas input yang diolah per tahunnya sebesar 660.000 ton. Sementara itu, perusahaan pembangunan *smelter*

yang akan beroperasi pada tahun 2017-2019 tercatat sebanyak 3 perusahaan dengan rincian kapasitas input yang diolah pertahunnya sebesar 1.600.000 ton (2017), 2.500.000 ton (2018), dan 855.000 ton (2019).

Berdasarkan perkembangan tersebut, dapat diketahui bahwa akan dihasilkan nikel/*ferronickel* dalam jumlah yang sangat banyak. Disamping itu, produksi nikel/*ferronickel* dari *smelter* juga menghasilkan produk sampingan atau limbah yang sering dikenal dengan terak (*slag*). Jumlah terak yang dihasilkan dari hasil pengolahan nikel/*ferronickel* cukup besar yaitu sekitar dua kali lebih besar dari produk utama atau sekitar 67% dari jumlah material input (Von Krüger dkk, 2010). Jumlah yang cukup besar tentu sangat berdampak, baik positif maupun negatif. Dampak negatifnya adalah limbah ini akan mengganggu ekosistem lingkungan sekitar industri. Sedangkan dampak positifnya adalah terak dapat digunakan sebagai material tambahan atau sebagai agregat (halus dan kasar) dalam pembuatan beton (Sato dkk, 2011), campuran aspal (Emery, 1984; Wang dkk, 2011), juga sebagai bahan baku material geopolimer yang dapat digunakan sebagai semen (Maragkos dkk, 2009). Di pihak lain, kebutuhan bahan dasar pembuatan semen semakin hari semakin berkurang. Selain itu, produksi semen memerlukan suhu dan energi yang tinggi serta menghasilkan gas CO₂ yang tinggi, dimana 1 ton produksi semen menghasilkan 1 ton gas emisi CO₂ (Davidovits, 1994). Oleh karena itu, perlu adanya material lain yang mampu mengurangi aspek-aspekt tersebut yang dapat dijadikan sebagai bahan dasar pembuatan semen atau sebagai alternatif pengganti semen. Untuk itulah material geopolimer dengan memanfaatkan terak feronikel dipilih sebagai salah satu material pengganti semen sehingga sangat penting untuk dikembangkan demi memenuhi kebutuhan bahan konstruksi dan bangunan.

Material geopolimer merupakan material yang dihasilkan dari reaksi geopolimerisasi sumber bahan baku aluminosilikat dengan menggunakan aktivator alkali. Proses ini terjadi pada temperatur kamar atau lebih (sekitar 90 °C). Material geopolimer sebagai semen karena memiliki komposisi kimia yang sama dengan material bahan baku pembuatan semen. Alasan lain material geopolimer sebagai bahan pengganti semen adalah ketersediaan bahan baku yang cukup banyak. Selain itu, proses sintesis geopolimer memerlukan temperatur yang

relatif rendah, konsumsi energi yang rendah, dan gas emisi CO₂ yang dihasilkan juga rendah jika dibandingkan dengan proses pembuatan semen. Disamping itu, material geopolimer (semen geopolimer) memiliki ikatan kuat dengan sebagian besar bahan, tidak memperluas atau kontrak, *foamable*, dan tahan terhadap garam, asam, dan basa serta lebih ramah lingkungan (Keltner and Sonafrank, 2010). Material geopolimer sebagai semen yang diproduksi berbeda dengan semen Portland. Hal ini karena tidak memerlukan suhu pembakaran yang sangat tinggi, dengan pengeluaran besar bahan bakar, juga tidak membutuhkan investasi modal yang besar seperti dalam pabrik dan peralatan (Davidovits, 1994).

Sebagaimana dijelaskan di atas, bahwa dalam sintesis material geopolimer digunakan aktivator yang berperan dalam proses geopolimerisasi. Beberapa aktivator yang sering digunakan adalah alkali hidroksida dan natrium silikat. Secara umum, aktivator yang digunakan adalah aktivator basa yang mengandung alkali hidroksida, silikat, aluminat, karbonat atau sulfat, atau kombinasi daripadanya. Dalam penelitian ini, penulis menggunakan aktivator natrium hidroksida dan natrium silikat dengan memvariasikan rasio Si/Al dalam terak.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penelitian ini yaitu bagaimana pengaruh rasio Si/Al terhadap sifat fisik-mekanik semen geopolimer berbasis terak feronikel?

1.3 Batasan Masalah

Adapun yang menjadi batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Komposisi terak feronikel dianggap sama.
2. Proses sintesis semen geopolimer dilakukan pada kondisi lingkungan dengan suhu, kelembapan dan tekanan dianggap sama untuk setiap variasi rasio Si/Al.
3. Suhu ruang dan tekanan dianggap sama untuk proses *curing* setelah pemanasan di oven.
4. Distribusi ukuran partikel terak feronikel dianggap sama untuk setiap variasi rasio Si/Al.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh rasio Si/Al terhadap sifat fisik-mekanik dan mikrostruktur semen geopolimer berbasis terak feronikel.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini adalah diharapkan hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi bagi industri-industri yang bergerak dibidang pembuatan semen dalam mengefisiensikan produk-produk yang dihasilkan. Disamping itu, hasil penelitian ini juga diharapkan mampu memberikan kontribusi positif dalam bidang konstruksi dan bangunan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan beberapa kajian pustaka dan teori dasar mengenai terak nikel dan material geopolimer mencakup material penyusunnya, sifat, proses pembuatan dan aplikasinya. Selain itu, akan dijelaskan konsep tentang aktivator yang digunakan dalam pembuatan material geopolimer.

2.1 Kajian Pustaka

Geopolimer merupakan material aluminosilikat yang disintesis dari material-material yang umumnya mengandung senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 sebagai sumber aluminosilikat. Material sumber aluminosilikat yang sering digunakan dalam sintesis material geopolimer dapat berupa *fly ash* (Rickard dkk, 2013; Phoo-ngernkham dkk, 2014; Görhan dan Kürklü, 2014; Nikolić dkk, 2015; Zhang dkk, 2015; Martin dkk, 2015), metakaolin (Bing-hui dkk, 2014; Cwirzen dkk, 2014; Ozer dan Soyer-Uzun, 2015), *fuel ash* (Lampris dkk, 2009; Mijarsh dkk, 2015), *raw clay* (Heath dkk, 2014; Selmani dkk, 2015), *blast furnace slag* (Yip dkk, 2008; Ismail dkk, 2014; Phoo-ngernkham dkk, 2015), terak seng (Alex dkk, 2013), terak ferokrom (Karakoç dkk, 2014), dan terak feronikel (Maragkos dkk, 2009; Komnitsas dkk, 2013; Lemonis dkk, 2015).

Sifat dan karakteristik material geopolimer dapat dipengaruhi beberapa faktor, diantaranya komposisi kimia bahan aluminosilikat, jenis dan konsentrasi aktivator, temperatur *curing* dan ukuran partikel dari bahan aluminosilikat (Lampiran 1). Beberapa peneliti sebelumnya telah melakukan studi tentang sintesis geopolimer. Dari hasil penelitian diketahui bahwa dengan meningkatnya konsentrasi aktivator alkali, kuat tekan dan kuat tarik fleksural meningkat hingga batas optimum yang juga dipengaruhi oleh temperatur *curing*. Kondisi optimum material geopolimer dengan kuat tekan 120 MPa dan kuat tarik fleksural 15 MPa adalah ketika *fly ash* diaktivasi dengan 14% NaOH, temperatur *curing* 115 °C selama 24 jam (Atiş dkk, 2015). Semakin tinggi temperatur *curing* berperan dalam mempercepat pembubaran (*dissolution*) partikel metakaolin dan reaksi

polimerisasi prekursor dalam reaksi awal geopolimerisasi dari sistem geopolimer berbasis metakaolin. Memperpanjang waktu *curing* meningkatkan pembentukan struktur yang keras terutama pada tahap awal geopolimerisasi. Peningkatan temperatur *curing* yang tepat juga mempercepat proses pengerasan dan memperbaiki sifat fisik material geopolimer. Namun, temperatur *curing* yang terlalu tinggi menimbulkan dampak negatif pada sifat fisik karena proses reaksi yang terlalu cepat sehingga menahan transformasi sampel geopolimer ke dalam struktur yang lebih kompak dan tangguh (Bing-hui dkk, 2014).

Peningkatan temperatur *curing* pada kondisi tertentu juga menyebabkan penurunan porositas dari material geopolimer yang juga dipengaruhi oleh konsentrasi larutan NaOH. Kondisi optimum dengan nilai kuat tekan tertinggi setelah 7 hari ketika geopolimer diaktivasi dengan larutan NaOH 6 molar pada temperatur *curing* 85 °C (Görhan dan Kürklü, 2014). Material geopolimer dari pasta *granulated blast furnace slag* (GBFS) menunjukkan bahwa kehadiran silikat meningkatkan pengembangan kekuatan dan dengan demikian pasta yang mengandung larutan natrium silikat (NS) memiliki sifat yang lebih baik. Kuat tekan yang relatif tinggi setelah 28 hari yaitu 171,7 dan 173,0 MPa diperoleh untuk pasta GBFS dengan masing-masing larutan natrium hidroksida dan natrium silikat (NHNS) dan natrium silikat. Penggunaan larutan natrium hidroksida dan natrium silikat mengakibatkan pembentukan gel amorf dari kristal kalsium silikat hidrat (CSH), sedangkan penggunaan larutan NS mengakibatkan terutama produk amorf (Phoo-ngernkham dkk, 2015).

Penambahan silika terlarut dalam fase berair meningkatkan jumlah pengikat polimer per volume material yang dihasilkan. Akibatnya, densitas geopolimer meningkat, sedangkan kapasitas penyerapan air menurun ke nilai-nilai sekitar 0,7%. Kuat tekan meningkat dengan peningkatan konsentrasi awal NaOH dari 1 molar ke 7 molar, dimana mencapai nilai kuat tekan maksimum 61,55 MPa (Maragkos dkk, 2009). Pada proses pembuatan semen geopolimer dengan menggunakan aktivator natrium hidroksida dan kalsium karbonat diketahui bahwa kandungan yang lebih tinggi dari natrium karbonat dan kalsium hidroksida cenderung meningkatkan pembebasan Ca^{2+} , Si^{4+} dan Al^{3+} dari butiran terak dan akibatnya meningkatkan laju geopolimerisasi. *Setting time* awal dan akhir dari

terak yang hanya diaktivasi oleh natrium hidroksida lebih lama dari campuran terak yang diaktivasi dengan natrium hidroksida dan kalsium karbonat. Peningkatan konsentrasi natrium karbonat dan kalsium hidroksida meningkatkan laju pembentukan geopolimer. Disamping itu, peningkatan pencampuran air hingga rasio W/C adalah 0,27, kelarutan aktivator kering meningkat mengarah peningkatan laju geopolimerisasi, sehingga terjadi peningkatan kuat tekan dengan penurunan penyerapan air (Abdel-Gawwad dkk, 2014).

Selain temperatur *curing*, jenis dan konsentrasi aktivator, serta lamanya pemanasan, rasio komponen kimia pada material juga berpengaruh pada sifat dan karakteristik material geopolimer, terutama kekutan. Kumar dkk (2015) mengemukakan bahwa pengembangan kuat tekan material geopolimer bukan fungsi parameter tunggal tetapi bergantung pada beberapa faktor, seperti rasio molar Si/Al, kehalusan partikel, kandungan material *glass*, jenis dan kuantitas reaksi yang dibentuk dan homogenitas struktur mikro.

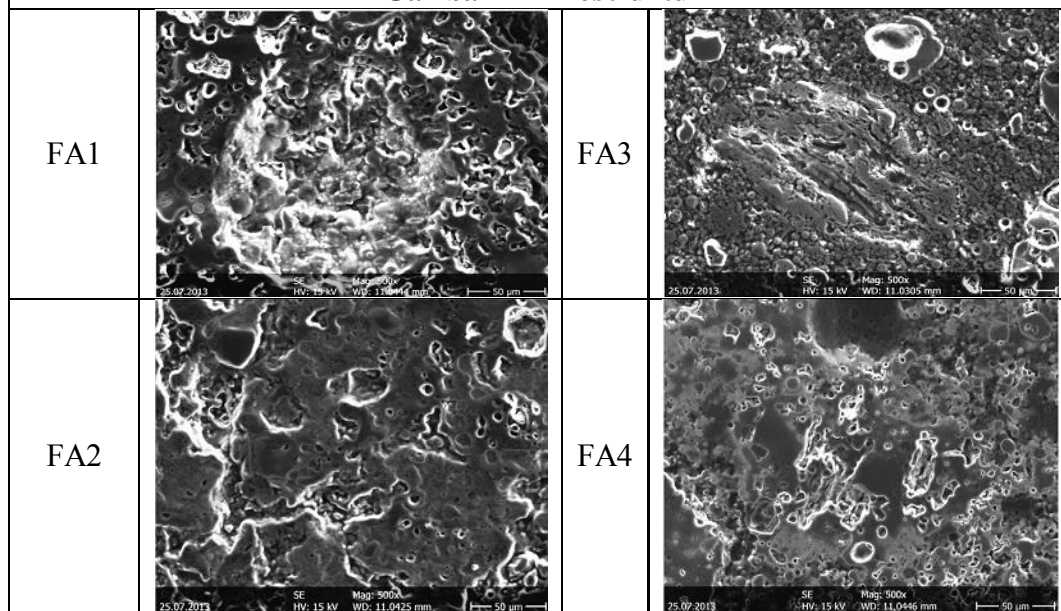
Perbandingan molar Si/Al pada geopolimer berbasis metakaolin diketahui memiliki sifat yang rapuh. Hal ini karena sintesis geopolimer berbasis metakaolin pada rasio molar Si/Al sama dengan 1,12 terkandung komponen yang sangat kristalin, yaitu zeolit A dan/atau sodalit dengan nilai kuat tekan yang rendah yaitu 1 MPa. Geopolimer dengan rasio molar yang lebih tinggi meningkatkan kuat tekan dimana pita utama dalam spektrum FTIR berada di daerah $900-1200\text{ cm}^{-1}$ merupakan indikasi terjadinya geopolimerisasi dan perpindahannya secara sistematis ke frekuensi yang lebih tinggi dengan meningkatnya rasio molar Si/Al. Hal ini yang dianggap sangat berhubungan dengan peningkatan kekuatan dari material tersebut (Ozer dan Soyer-Uzun, 2015).

Tabel 2.1 merupakan karakteristik mikrostruktur yang dipengaruhi komposisi kimia. Berdasarkan Tabel 2.1 dapat dijelaskan bahwa komposisi kimia berperan pada pembentukan mikrostruktur dimana struktur yang lebih padat diperankan oleh rasio dari Si/Al dan Na/Si. Pada rasio Si/Al dan Na/Si yang semakin berkurang berperan pada pembentukan fase gel padat yang terjadi secara merata serta mereduksi porositas.

Tabel 2.1 Fitur Mikrostruktur Sampel Geopolimer yang Diperoleh Menggunakan SEM-EDS.

Sampel	Fitur Morfologi	Ringkasan EDS
FA1	Struktur berpori dengan banyak kuarsa yang tidak bereaksi, kaya akan fase besi, kalsium, karbon, dan gel tersebar	Variasi komposisi gel dari Si/Al = 1,5-1,8 dan Na/Si = 1,4-3,0 Fase kaya Fe kemungkinan hematit dan fase kaya Ca mempunyai Ca/Si = 0,6-0,7, Ca/Al = 1,3-1,6
FA2	Struktur berpori dengan banyak kuarsa yang tidak bereaksi, kaya akan fase karbon, dan gel tersebar	Variasi komposisi gel dari Si/Al = 1,3-1,7 dan Na/Si = 0,4-1,5, fase kaya C mempunyai Ca/Si = 0,16-0,18, Ca/Al = 0,4-0,6, dan Ca/Na = 0,9-1,0
FA3	Mikrostruktur yang kompak (padat) dengan fase gel padat dan porositas rendah, cenosphere bereaksi sebagian dan partikel kuarsa yang tidak bereaksi	Variasi komposisi gel dari Si/Al = 1,5-1,8 dan Na/Si = 1,4-3,0
FA4	Fase gel padat yang merata cenosphere bereaksi sebagian dan partikel kuarsa yang tidak bereaksi	Variasi komposisi gel dari Si/Al = 1,3-1,5 dan Na/Si = 1,1-1,6

Gambar Mikrostruktur



Sumber: Kumar dkk, 2015

2.2 Terak (*Slag*) Nikel

2.2.1 Pengertian

Terak adalah hasil sampingan pemisahan logam dari bijihnya melalui proses *pyrometallurgy* menggunakan panas. Umumnya dihasilkan dari proses pengolahan bijih mineral menjadi logam, atau juga dihasilkan dari proses pengecoran logam. Menurut Vignes (2011), *slag* (terak) merupakan campuran cair dari oksida dan silikat logam. Terak terbentuk dalam operasi peleburan dimana logam diekstraksi dari bijih yang mengandung beberapa mineral seperti SiO_2 , MgO , dan Al_2O_3 . Terak juga terbentuk dalam *matte converting* atau pemurnian logam mentah yang menyerap pengotor oksida-oksida seperti P_2O_5 , MnO atau SiO_2 . Terak dapat menyerap sulfida-sulfida (dari desulfurisasi baja). Fluorida, CaF_2 sengaja ditambahkan untuk temperatur rendah dari cairan terak. Terak feronikel adalah produk sampingan industri yang dihasilkan selama peleburan menjadi feronikel yang digunakan dalam pembuatan baja tahan karat (*stainless steel*) dan paduan nikel (Sato dkk, 2011). Terak nikel adalah limbah buangan dari industri pengolahan nikel yang membentuk *liquid* panas yang kemudian mengalami pendinginan sehingga membentuk batuan alam yang terdiri dari *slag* padat dan *slag* yang berpori sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Terak Feronikel

Jumlah terak yang dihasilkan dari produksi feronikel dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hasil Utama – Feronikel Smelting – Lapisan Bijih Utama

Parameter Utama			Paduan		Terak	
	Kg/t bijih	Kg/t paduan	Co	0.26%	CoO	0.02%
Masukan			Si	0.18%	SiO ₂	47.68%
Bijih	1000	11686	Fe	69.64%	Cr ₂ O ₃	1.09%
Kokas	34	398	Cu	0.14 %	NiO	0.51%
Elektroda	6	70	Cr	0.17%	MgO	33.02%
Keluaran			Ni	29.54%	FeO	17.34%
Paduan	86	1000	P	0.06%	Cu ₂ O	0.00%
Terak	701	8194	Selektivitas	1.83%	SiO ₂ /MgO	1.44%

Sumber: Von Krüger dkk, 2010

2.2.2 Komposisi Kimia

Terak hasil pengolahan bijih nikel banyak mengandung oksida-oksida seperti MgO, Fe₂O₃, CaO, Al₂O₃, SiO₂, dan beberapa unsur-unsur lain. Tabel 2.3 menunjukkan komposisi kimia terak dari berbagai sumber. Tabel 2.3 juga menunjukkan bahwa terdapat beberapa jenis terak berdasarkan komposisi kimianya. Secara umum, komposisi kima terbanyak adalah Fe, Si dan Al, namun beberapa diantaranya mengandung kalsium dan magnesium yang tinggi (*high calcium and magnesium slags*).

Tabel 2.3 Komposisi Kimia Terak (Diadopsi dari Berbagai Sumber)

Jenis	Referensi	Komposisi Kimia (%)						SO ₃
		Total Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	
FNS-A	Choi dan Choi, 2015	7,13	62,80	1,95	2,07	24,70	0,13	0,03
FNS-W		11,10	58,10	2,29	0,29	26,50	0,09	0,04
FNS	Lemonis dkk, 2015	40,02	41,18	5,98	4,12	7,79	0,09	0,64
FNS	Komnitsas dkk, 2013	43,83	32,74	8,32	3,73	2,76	-	-
HMNS	Yang dkk, 2014	4,20	52,27	6,19	8,77	26,93	0,11	-
GGBFS	Deb dkk, 2014	0,52	29,96	12,25	45,45	-	0,31	3,62
GBFS	Nath dan Kumar, 2013	1,49	32,01	17,35	33,06	11,43	1,24	0,06
GBFS	Ismail dkk, 2014	0,40	33,80	13,70	42,60	5,30	0,10	-

Tabel 2.4 memperlihatkan komposisi kimia material FNS dan FA memiliki perbedaan mendasar pada komposisi oksida-oksida penyusunnya. Komposisi terbesar penyusun FNS adalah oksida besi dan oksida silica,

sedangkan pada FA, oksida penyusun utama adalah oksida silika dan alumina. Oksida silika pada FA memiliki komposisi terbesar dibandingkan dengan FNS, sebagaimana komposisi oksida besi FNS lebih besar dari FA.

Tabel 2.4 Perbandingan Komposisi Kimia antara *Ferronickel Slag* (FNS) dan *Fly Ash* (FA) (Pustaka)

Jenis	Referensi	Komposisi Kimia Utama (% massa)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
FA	Fansuri dkk, 2008	38,08	10,72	10,98	5,26	8,36	2,78	19,27
FA	Ahmari dkk, 2012	57,5	29,3	6,0	1,36	2,6	NA	2,95
FA	Nath, 2013	63,83	26,93	1,5	0,72	4,1	2,00	4,8
FA	Chithiraputhiran, 2012	57,96	23,33	5,03	-	1,28	-	4,61
FA	Mo dkk, 2015	49,7	20,50	5,39	1,42	0,69	1,16	15,09
FA	Zaharaki dkk, 2009	33,40	13,10	35,31	3,67	0,46	0,76	5,60
FNS	Komnitsas dkk, 2013	32,74	8,32	3,73	2,76	-	-	43,83
FNS	Lemonis dkk, 2015	41,18	5,98	4,12	7,79	0,09	0,37	40,02
FNS	Maragkos dkk, 2009	40,29	10,11	3,65	5,43	-	-	-

2.2.3 Jenis-jenis Terak

Berdasarkan bentuknya, *slag* nikel dapat dibedakan menjadi tiga tipe yaitu *high*, *medium*, dan *low slag*. Terak nikel yang masuk kategori *high* diperoleh dari proses pemurnian di *converter* berbentuk pasir halus berwarna coklat tua, sedangkan kategori *medium* dan *low slag* diperoleh lewat tungku pembakaran (*furnace*). Berdasarkan bentuk strukturnya, terak dibedakan menjadi terak berpori dan terak padat.

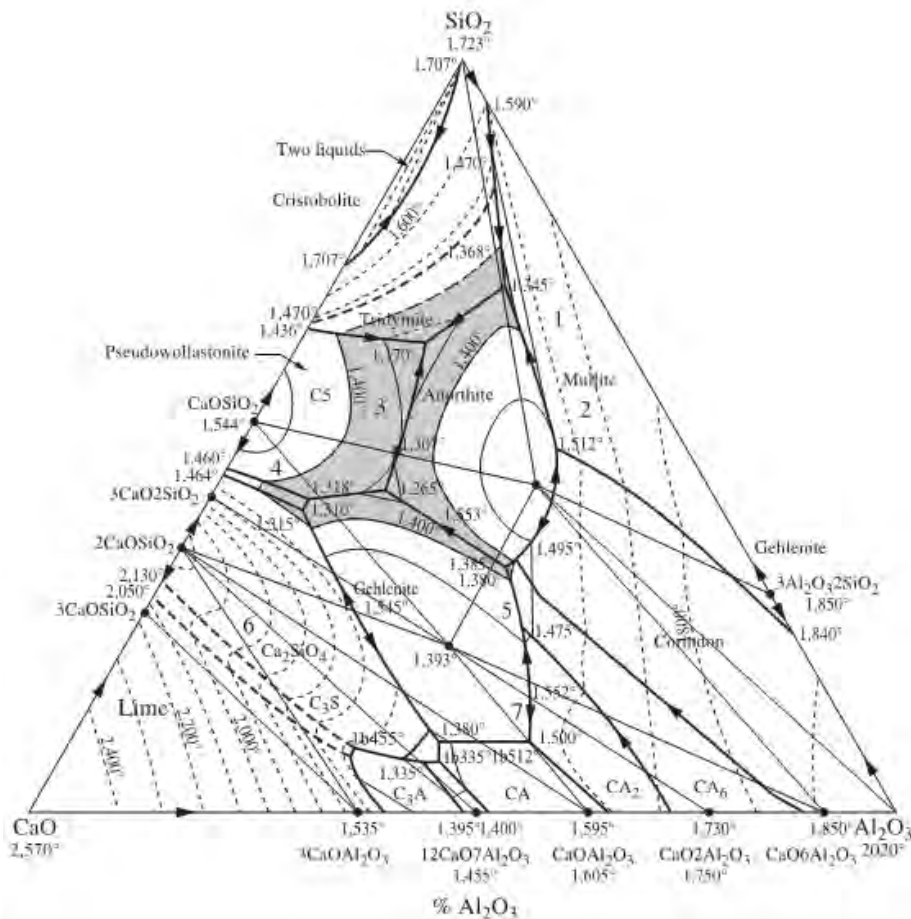
Selain sebagai bahan dasar pembuatan material geopolimer, terak nikel merupakan limbah industri nikel berupa bongkahan dan memiliki bobot yang besar, sehingga dimungkinkan untuk digunakan sebagai material pengganti *iron ore* untuk beton pemberat pipa.

2.2.4 Diagram Fase Terak

2.2.4.1 Sistem CaO-SiO₂-Al₂O₃

Diagram fase terak sistem CaO-SiO₂-Al₂O₃ dapat dilihat pada Gambar 2.2. Diagram tersebut merupakan dasar dari kebanyakan terak metalurgi. Untuk sistem *ternary*, diagram fase dengan lembah cair (*liquidus valleys*) dan isotermik cair (*liquidus isotherms*) mengindikasikan bahwa daerah fase cair terletak pada suhu

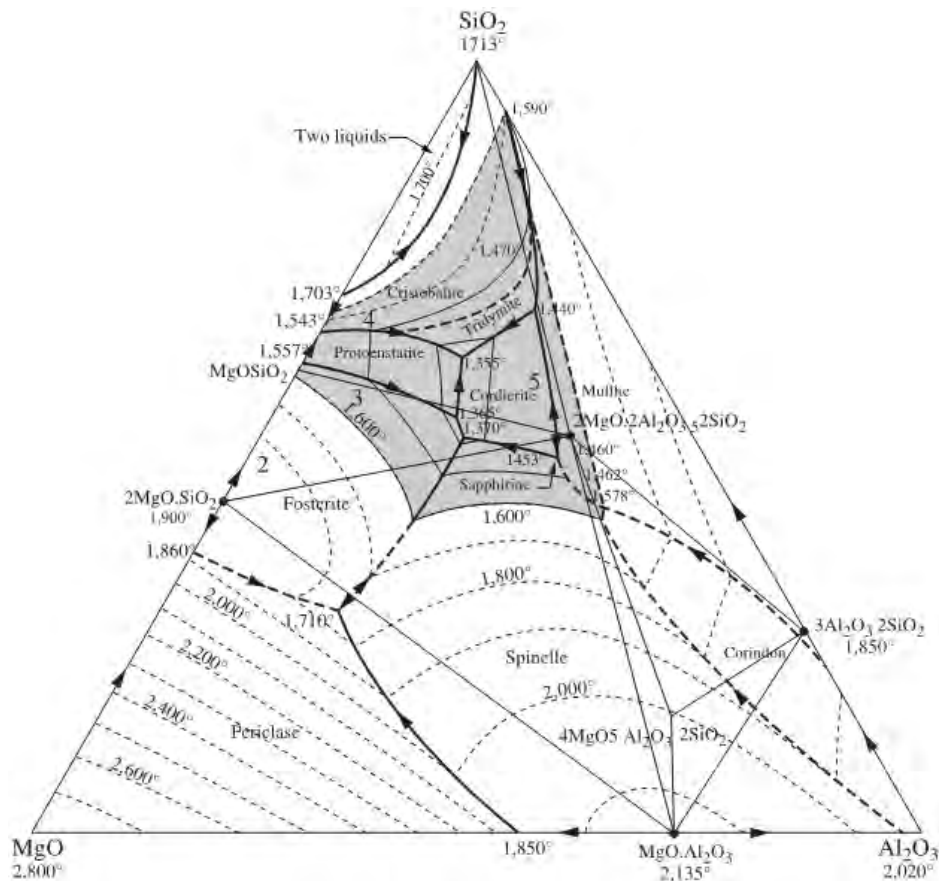
yang sesuai. Daerah dengan fase cair kecil pada 1400 °C dan pada 1600 °C merupakan daerah fase cair yang relatif besar. Sebagaimana oksida ini (CaO, SiO₂, dan Al₂O₃) menyajikan masing-masing keadaan oksidasinya, diagram fase tersebut tidak bergantung pada tekanan oksigen (dalam fase gas) dalam kontak dengan terak.



Gambar 2.2 Diagram Fase Terak Sistem CaO-SiO₂-Al₂O₃ (Vignes, 2011)

2.2.4.2 Sistem MgO-SiO₂-Al₂O₃

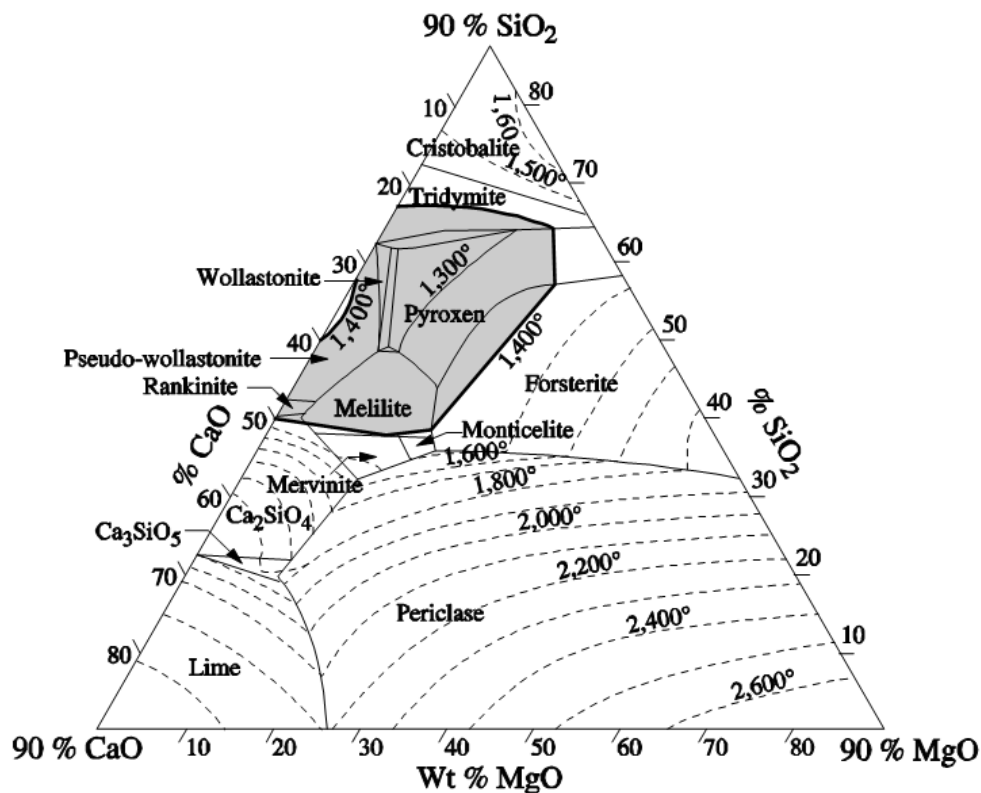
Diagram fase sistem ini (Gambar 2.3) merupakan dasar dari terak dalam reduksi peleburan bijih ferrokrom (*ferrochrome ores*) dalam tungku listrik. Daerah kecil fase cair pada 1600 °C dibandingkan terhadap sistem sebelumnya harus dicatat. Komposisi dasar dari terak adalah SiO₂ (40%), MgO (35%), Al₂O₃ (15%) dan CaO (10%) dalam persen molar.



Gambar 2.3 Diagram fase Terak Sistem $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (Vignes, 2011)

2.2.4.3 Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$

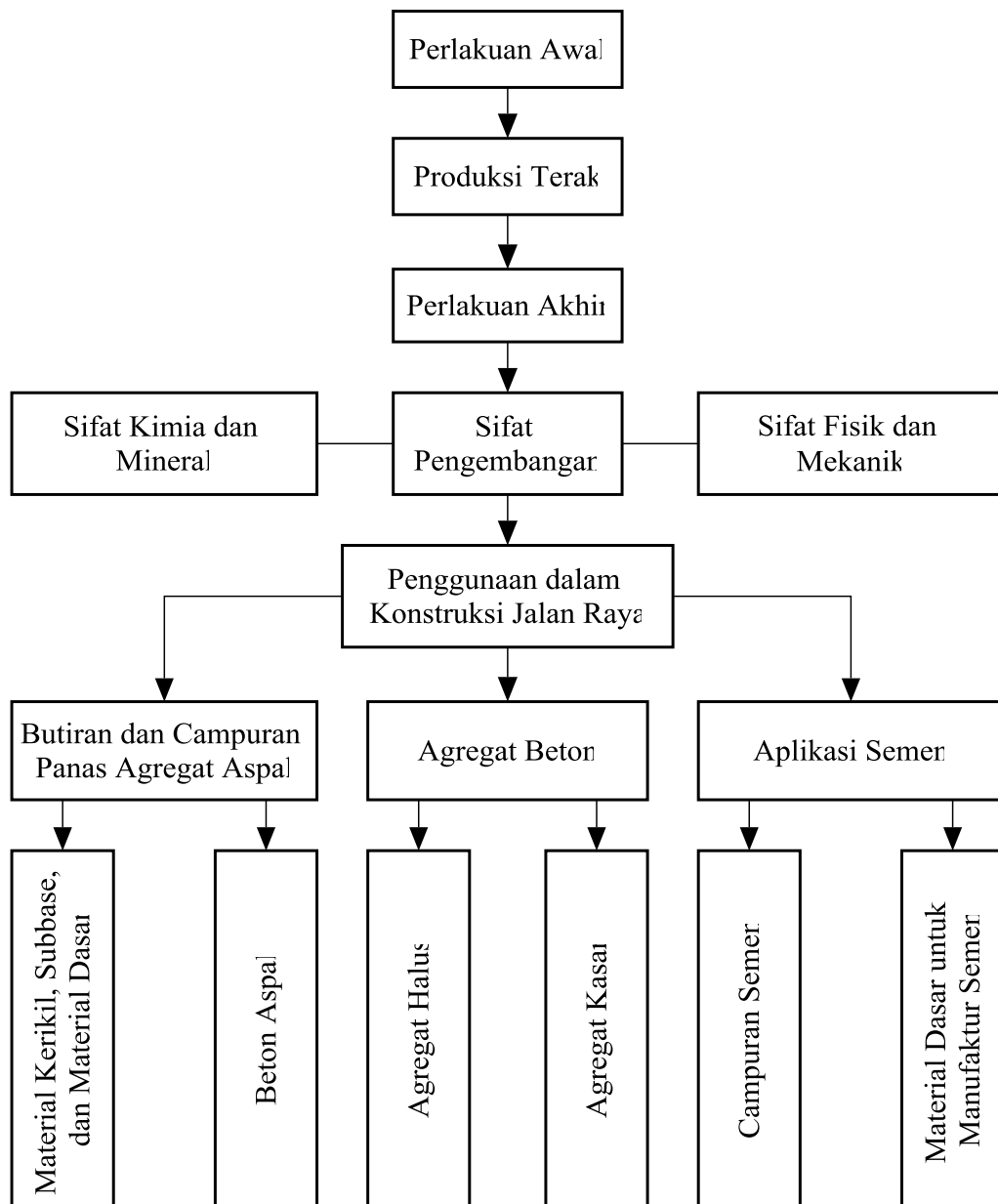
Untuk terak sistem kuartir $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$, daerah fase cair pada suhu sebagaimana yang ditunjukkan dalam proyeksi planar dari diagram sistem *pseudo-ternary* $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ untuk kandungan MgO dan diagram sistem *pseudo-ternary* $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ untuk kandungan Al_2O_3 (10%). Terak tanur tinggi (*blast furnace slag*) memiliki komposisi rata-rata kandungan kimianya adalah CaO (42,5%), SiO_2 (35,5%), Al_2O_3 (10,5%), dan MgO (7,5%) (Gambar 2.4). Terak ini harus menjadi cair pada menuangkan suhu logam panas, pada 1400 °C. Daerah terak cair fase pada suhu ini relatif kecil, memiliki iskositas sekitar 100 kali lebih tinggi daripada viskositas logam panas.



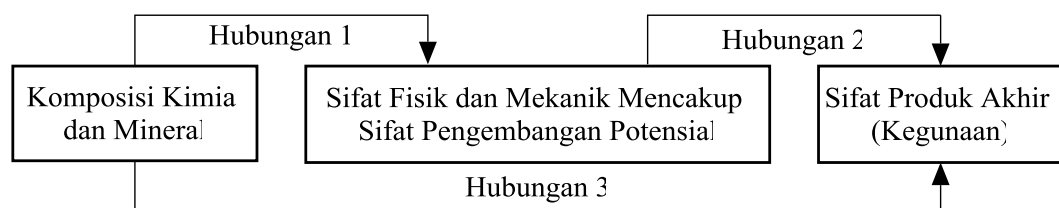
Gambar 2.4 Diagram Fase Terak Sistem $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ (10%) (Vignes, 2011)

2.2.5 Aplikasi dan Penggunaan Terak Nikel

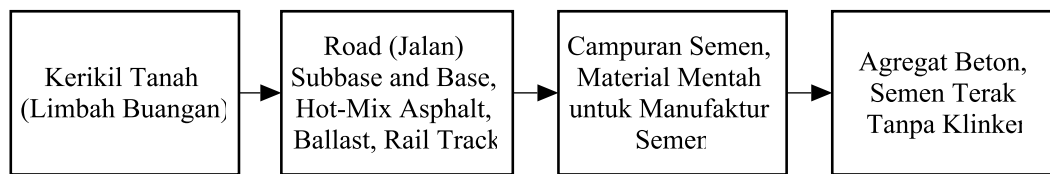
Secara umum, terak digunakan dalam bidang konstruksi terutama penggunaannya untuk jalan raya sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.5. Gambar 2.5 menggambarkan bahwa penggunaan terak sebagai konstruksi bangunan jalan raya merupakan pengembangan dari sifat ekspansi. Hal ini yang menjadi peranan sehingga terak dapat diaplikasikan sebagai campuran aspal, sebagai agregat pada pembuatan beton, atau sebagai aplikasi pembuatan semen. Gambar 2.6 menunjukkan hubungan antara komposisi mineral dan kimia dengan sifat fisik maupun sifat mekanik sehingga produk aplikasi dapat disesuaikan sesuai keinginan dan berdasarkan sifat-sifat tersebut. Dengan demikian, akan ada pembagian pemanfaatannya berdasarkan kelompok-kelompok tertentu sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.5 Keseluruhan Proses Pemanfaatan Terak dalam Konstruksi Jalan Raya (Wang dan Emery, 2004)



Gambar 2.6 Hubungan Pemanfaatan Terak dalam Konstruksi Jalan Raya (Wang dan Emery, 2004)



Gambar 2.7 Kelas Khas Pemanfaatan Terak dalam Konstruksi Jalan Raya (Wang dan Emery, 2004)

2.2.5.1 Terak Nikel sebagai Agregat pada Pembuatan Beton

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Sugiri dkk (2005) menunjukkan bahwa kuat tekan beton pada umur 7 dan 28 hari masing-masing adalah 36,10 dan 50,77 MPa. Selain itu, komposisi campuran dengan menggunakan agregat terak nikel memiliki absorpsi beton yang kecil, yaitu 0,61%.

Hasil penelitian yang dilakukan Risdiyanto (2013) menunjukkan bahwa kekuatan beton yang dibuat dengan agregat kasar batu pecah merapi sangat tinggi. Beton yang dibuat dengan perbandingan volume memiliki kuat tekan rerata yang relatif lebih tinggi dari pada beton yang dibuat dengan perbandingan berat. Kuat tekan beton dengan perbandingan berat setelah umur 7 dan 28 hari masing-masing sebesar 29,58 dan 35,20 MPa. Sedangkan kuat tekan untuk beton dengan perbandingan volume setelah umur 7 dan 28 hari masing-masing sebesar 31,04 dan 38,13 MPa. Penelitian lain menunjukkan bahwa variasi penggantian terak sebagai pengganti sebagian agregat kasar menyebabkan kuat lentur beton menurun serta diperoleh berat jenis beton normal pada variasi penggantian terak 80%. Penggantian terak 100% tidak menghasilkan beton normal karena berat jenis yang dihasilkan lebih dari 2500 kg/m³ (Susilowati, 2013).

2.2.5.2 Terak sebagai Campuran Semen Portland

Campuran yang terbuat dari 50% terak dan 50% semen Portland putih menunjukkan, pada rata-rata, tingkat tahanan tekan antara 35 dan 60 MPa, nilai tahanan listrik sekitar lima kali lebih besar, dengan biaya berkurang sekitar 14,6% per m³. Untuk kekuatan yang sama penggantian semen Portland putih dengan terak lebih ekonomis (Lübeck dkk, 2012).

Penelitian lain menunjukkan bahwa penambahan 20% terak pada *Ordinary Portland Cement* (OPC) dengan rasio air/semen sebesar 0,32 memperlihatkan porositas yang rendah dan semakin menurun dengan meningkatnya waktu *curing*. Selain itu, kekuatan tekan juga meningkat dengan peningkatan waktu *curing* dimana nilai kuat tekan pasta semen pozzolan umumnya lebih rendah dari campuran kontrol sampai 360 hari. Namun, campuran dengan penambahan terak memiliki kekuatan yang lebih tinggi pada waktu *curing* 180 dan 380 hari (Saraya, 2014). Untuk campuran semen, peningkatan suhu dan/atau peningkatan % Na₂O yang efektif untuk meningkatkan reaktivitas dan sifat mekanik. Pembentukan N-C-S-H di produk hidrasi dan hidrasi semen yang lebih lambat diketahui memberikan kontribusi terhadap kekuatan yang lebih rendah dalam campuran yang diaktifasi (Escalante-Garcia dkk, 2014).

2.2.5.3 Terak sebagai Material Geopolimer

Terak merupakan salah satu material bahan dasar pembuatan material geopolimer, baik sebagai semen geopolimer maupun dalam bentuk beton geopolimer. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Maragkos dkk (2009) menunjukkan bahwa kuat tekan geopolimer adalah fungsi non-monoton dari konsentrasi awal NaOH dalam fase air dari sistem. Kuat tekan meningkat sebagai peningkatan konsentrasi NaOH dari 1 molar ke 7 molar, kemudian menurun dengan peningkatan konsentrasi NaOH dari 7 molar untuk 10 molar. Hal ini mengungkapkan bahwa efek non-monoton dari konsentrasi NaOH pada kuat tekan adalah khas untuk sistem geopolimerik.

Kondisi optimum untuk sintesis geopolimer berbasis terak fèronikel yang dihasilkan adalah S/L rasio sama dengan 5,4 g/mL, konsentrasi NaOH awal dalam fase air sebesar 7 molar dan konsentrasi awal SiO₂ dalam fase berair adalah 4 molar. Geopolimer yang diproduksi pada kondisi optimum memiliki kuat tekan sebesar 120 MPa, kapasitas penyerapan air sebesar 0,7% dan kepadatannya sebesar 2480 kg/m³.

2.3 Semen

2.3.1 Pengertian

Semen adalah nama umum dan dikenal seluruh dunia sebagai *Ordinary Portland Cement* (OPC). Selama periode waktu, semen khusus telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan spesifik konstruksi. Selanjutnya untuk khusus semen dengan aplikasi beban berat yang membutuhkan kekuatan lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat dan dengan evolusi panas yang rendah juga telah dikembangkan (Deolalkar, 2009).

2.3.2 Tipe-tipe Semen

Semen dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu semen Portland dan semen non-Portland, masing-masing secara ringkas dapat dilihat pada Tabel 2.5 dan 2.6.

Tabel 2.5 Tipe-tipe Semen Portland

Tipe	Nama	Komposisi Kimia	Sifat dan Penggunaan
I	OPC	5.0% MgO, dan 2.5 – 3.0% SO ₃	Bidang konstruksi dengan ketahanan terhadap sulfat dan panas hiderasi yang tinggi
II	MHPC	20.0% SiO ₂ , 6.0% Al ₂ O ₃ , 6.0% Fe ₂ O ₃ , dan 6.0% MgO	Untuk pemakaian konstruksi yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hiderasi yang sedang, biasanya digunakan untuk daerah pelabuhan dan bangunan sekitar pantai
III	HEPC	6.0 % MgO, 3.5 – 4.5% Al ₂ O ₃ , 35.0 % C ₃ S, dan 15% C ₃ A	Untuk pembangunan gedung-gedung besar, pekerjaan-pekerjaan berbahaya, pondasi, pembeconan udara dingin, dan pada <i>prestreeed coccretel</i> , yang memerlukan kekuatan awal yang tinggi.
IV	LHPC	6.5 % MgO, dan kandungan C ₃ S dan C ₃ A lebih rendah	Untuk bangunan dengan panas hiderasi rendah misalnya pada bangunan beton yang besar dan tebal, sangat baik untuk mencegah keretakan
V	SRPC	6.0% MgO, 2.3% SO ₃ , dan 5% C ₃ A	Untuk bangunan di daerah yang kandungan sulfatnya tinggi, misalnya: pelabuhan, terowongan, pengeboran di laut, dan bangunan pada musim panas
OPC (Ordinary Portland Cement), MHPC (Moderate Heat Portland Cement), HEPC (High Early Strength Portland Cement), LHPC (Low Heat Portland Cement), SRPC (Sulphato Resistance Portland Cement)			

Sumber: Firdaus, 2007

Tabel 2.6 Tipe-tipe Semen (non-Portland) dan Penggunaannya

No. Seri	Tipe	Nama	Sifat Menonjol	Penggunaan
1	Semen pengerasan cepat	RHC	Mirip dengan OPC; halus; pengembang kekuatan lebih cepat	Terutama untuk konstruksi dengan waktu yang cepat
2	Semen tahan sulfat	SRC	Komposisi disesuaikan untuk memberikan peningkatan ketahanan terhadap perairan bantalan sulfat	Untuk lapisan kanal, gorong-gorong dan konstruksi dimana kondisi terkena alkali tinggi
3	Semen panas rendah	LHC	Komposisi mengurangi panas hidrasi; dikembangkan lebih lambat	Untuk konstruksi yang melibatkan massa beton seperti bendungan
4	Semen alumina tinggi		Dibuat dengan sintering kapur dan bauksit; mengembangkan kekuatan cepat mendekati kekuatan akhir dalam 24 jam	Terutama untuk kecepatan kerja seperti jalan di kota dan tumpukan pengecoran
5	Semen sumur minyak		Semen komposisi kimia khusus; dengan ukuran yang agak kasar	Untuk memperkuat selubung baja dari dinding bore
6	Semen putih	WPC	Oksida besi < 0.4%	Berwarna putih; digunakan untuk tujuan dekoratif, ubin mosaik; cat semen
7	Semen pozzolan		Memiliki panas hidrasi rendah	Untuk beton
8	Semen terak blast furnace	BFSC	Panas rendah hidrasi; juga lebih tahan sulfat	Digunakan untuk bendungan dan struktur penahan air lainnya
9	Semen kekuatan			Digunakan dalam konstruksi di mana huttering diperlukan untuk menghilangkan lebih awal; dalam konstruksi silo dengan selip bentuk <i>shuttering</i>

Sumber: Deolalkar, 2009

Tabel 2.5 merupakan tipe-tipe semen Portland yang didasarkan pada komposisi kimia yang menjadi bahan baku pembuatan semen itu sendiri. Berdasarkan Tabel 2.6, diketahui bahwa salah satu tipe semen adalah *blast furnace slag cement* (BFSC), dengan sifat panas hidrasi yang rendah dan memiliki

ketahanan terhadap sulfat. Dewasa ini, BFSC banyak menjadi perhatian karena memiliki banyak manfaat, baik sebagai semen alternatif maupun sebagai campuran semen Portland, ditinjau dari berbagai sifatnya.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa semen Portland *blast furnace slag* (PSC) dengan penambahan 10% semen debu kiln (*cement kiln dust, CKD*) dan 5% *silica fume* (SF) memiliki kekuatan tekan yang cukup besar, yaitu 316,20 – 823,65 MPa untuk hari pertama pengerasan hingga 90 hari. Hal ini karena pada campuran tersebut memberikan nilai W_n (kandungan air) tertinggi dibandingkan dengan pasta yang lain. Oleh karena itu, *silica fume*, karena luas permukaan yang sangat tinggi dan ukuran butir sangat kecil, berinteraksi cepat dengan kalsium hidroksida bebas, yang dibebaskan dari klinker hidrasi, yang mengarah ke pembentukan berlebihan kalsium silikat hidrat (CSH) (Abdel Rahman dkk, 2011).

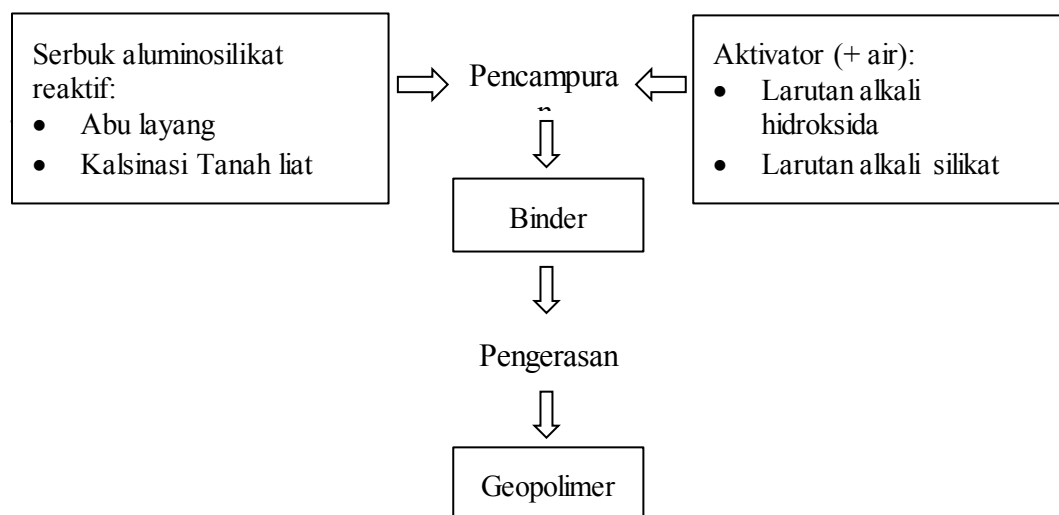
2.4 Material Geopolimer

2.4.1 Pengertian

Geopolimer secara umum didefinisikan sebagai bahan aluminosilikat padat dan stabil yang dibentuk oleh hidroksida alkali atau aktivasi silikat alkali dari prekursor yang biasanya (tetapi tidak selalu) diberikan sebagai serbuk padat. Geopolimer merupakan material baru yang dapat digunakan untuk pelapis (*coating*) dan perekat (*adhesive*), sebagai pengikat untuk komposit serat (*fiber composites*), enkapsulasi limbah (*waste encapsulation*), dan sebagai semen untuk beton. Sifat dan penggunaannya masih banyak menjadi perhatian oleh banyak disiplin ilmu dan industri, seperti kimia anorganik modern, kimia fisik, kimia koloid, mineralogi, geologi, dan dalam semua jenis teknologi proses teknik (*engineering*) (Davidovits, 2011). Menurutnya, ada sembilan kelas yang berbeda dari geopolimer, tetapi kelas yang terbesar sebagai aplikasi potensial untuk infrastruktur transportasi adalah bahan aluminosilikat yang dapat digunakan untuk menggantikan semen Portland dalam konstruksi beton.

2.4.2 Proses Sintesis

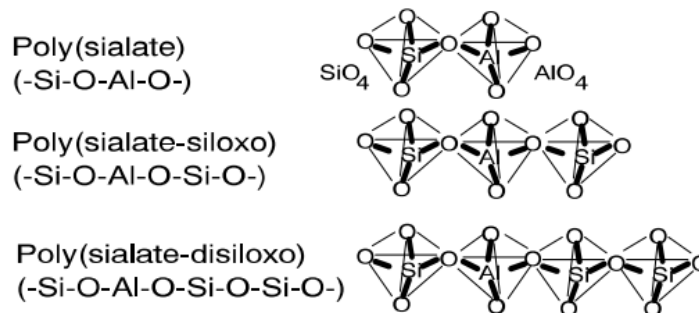
Geopolimer disintesis melalui proses geopolimerisasi menggunakan larutan aktivasi alkali. Hal ini disintesis dengan mencampur pada suhu kamar atau lebih tinggi (misalnya 90 °C) serbuk aluminosilikat reaktif (misalnya *fly ash*, *metakaoline*, tanah liat) dengan aktivator basa yang mengandung alkali hidroksida, silikat, aluminat, karbonat atau sulfat, atau kombinasi daripadanya (Gambar 2.8). Proses geopolimerisasi secara substansial melibatkan reaksi kimia yang cepat dalam kondisi basa pada mineral Si-Al yang menghasilkan tiga dimensi rantai polimer dan struktur cincin yang terdiri dari obligasi Si-O-Al-O, $M_n[-(SiO_2)_z-AlO_2]_n \cdot wH_2O$, dimana M adalah unsur alkali atau kation seperti kalium, natrium, atau kalsium; n adalah derajat polimerisasi; dan z adalah suatu bilangan bulat 1, 2, 3 atau lebih dari 15.



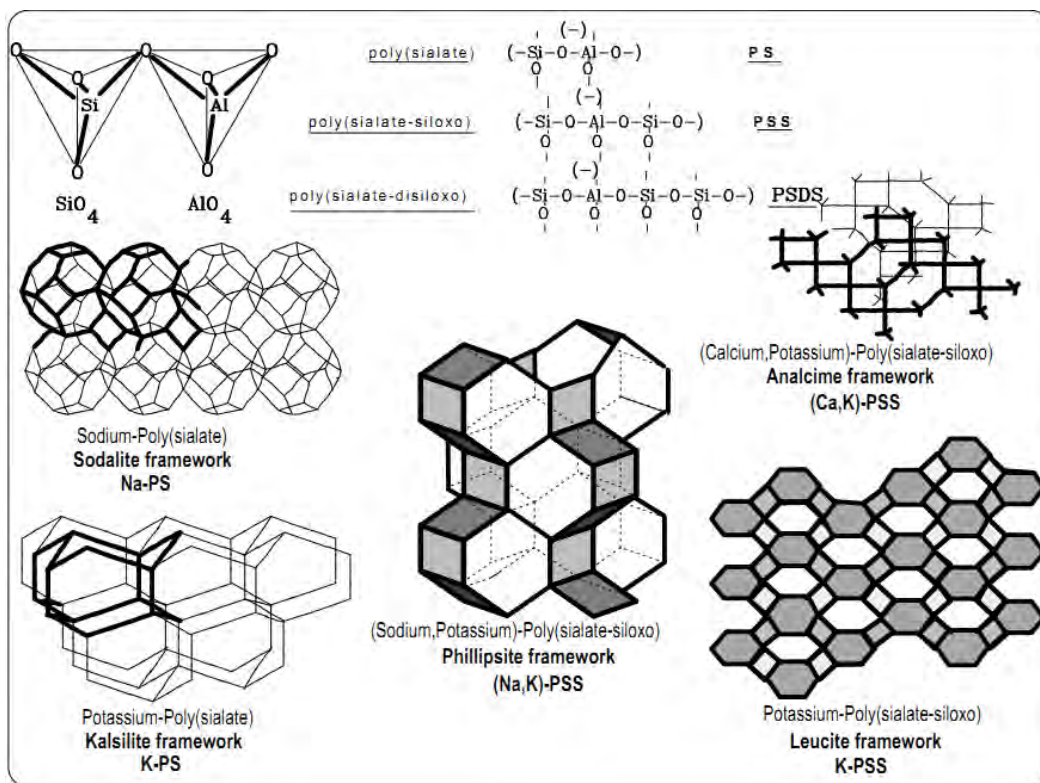
Gambar 2.8 Proses Produksi Geopolimer (De Weerd, 2011)

Diagram alir yang disederhanakan untuk sintesis geopolimer biasanya mencakup (a) *pretreatment* mekanik bahan baku aluminosilikat padat (*crushing* dan *grinding*), (b) persiapan fase awal cairan silikat alkali, (c) pencampuran dari fase padat dan cair, (d) pencetakan pasta, (e) *curing* pada suhu rendah sampai sedang (40-80 °C) selama beberapa jam, dan (f) pengaturan di lingkungan (Dimas dkk, 2009). Produk reaksi terutama aluminosilikat fase kaca amorf dibentuk dari

saling ikat antara struktur tetrahedral SiO_4^{4-} dan AlO_4^{5-} membentuk struktur 3-Dimensi (De Weerd, 2011).



Gambar 2.9 Struktur Geopolimer Berdasarkan Perbandingan Si dan Al (Davidovits, 1994)



Gambar 2.10 Grafis Molekul Komputer dari Polimer $\text{M}_n(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)_n$ poly(sialate) and $\text{M}_n(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)_n$ poly(sialate-siloxo), dan Ikatan Kerangkanya (Davidovits, 1994)

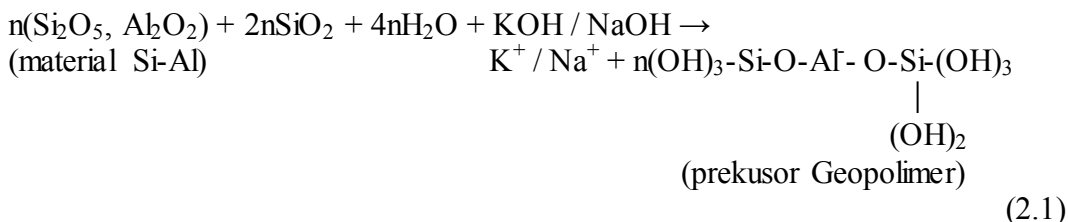
Penunjukkan struktur kimia geopolimer berdasarkan siliko-aluminat atau poli(sialat) dimana jaringan sialat terdiri dari jaringan tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 terkait dengan pertukaran semua atom oksigen. Adanya ion positif (Na^+ , K^+ , Li^+ ,

Gambar 2.9 dan 2.10 (Davidovits, 1994).

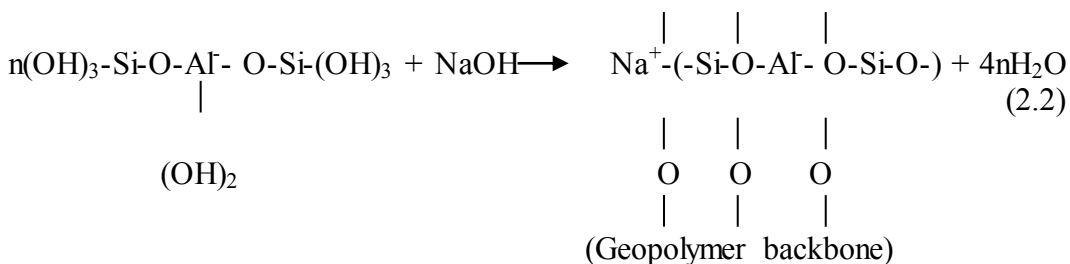
2.4.3 Mekanisme Geopolimerisasi

polimerisasi berlangsung menurut skema berikut (Chanh dkk, 2008):

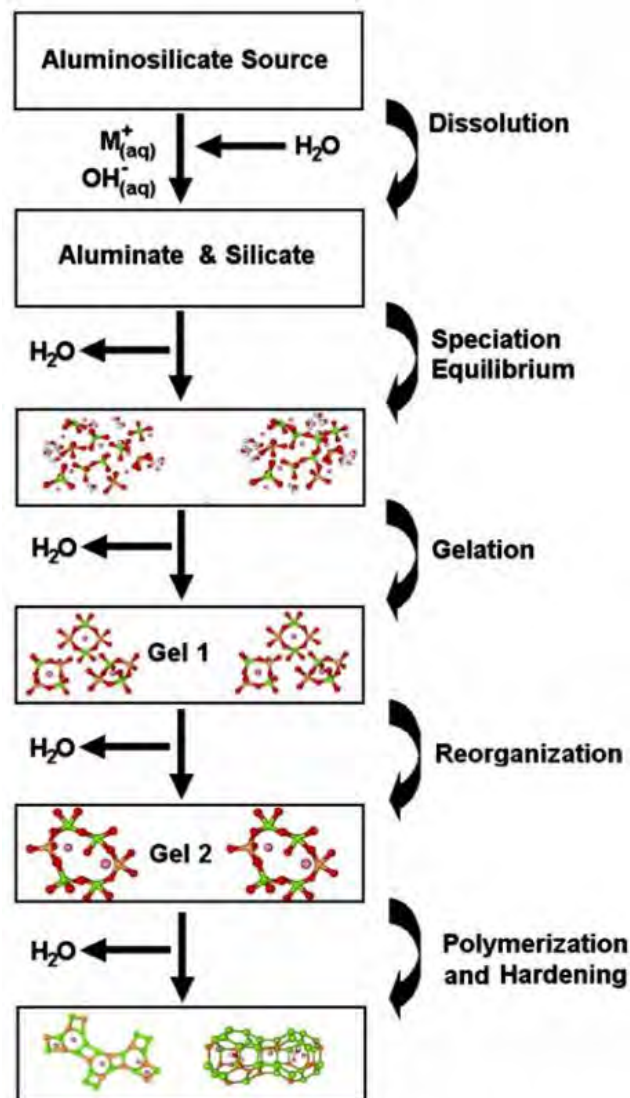
1. Pembentukan prekursor geopolimer



2. Pembentukan *geopolymer backbone*



2.11.



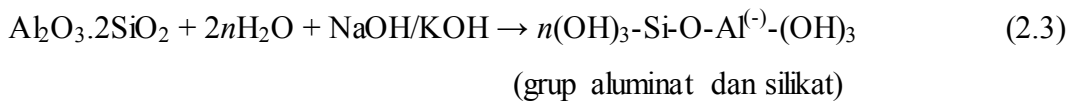
Gamba 2.11 Model Konseptual Proses Geopolimerisasi (Duxson dkk, 2007b)

Gambar 2.11, dapat dijelaskan bahwa proses pembentukan material geopolimer melalui reaksi geopolimerisasi berlangsung secara linier, walau pada kenyataannya terjadi secara bersamaan. Pembubaran (*dissolution*) sumber aluminosilikat padat oleh hidrolisis basa (mengonsumsi air) menghasilkan grup aluminat dan silikat. Pembubaran partikel padat di permukaan mengakibatkan pembebasan aluminat dan silikat (kemungkinan besar dalam bentuk monomer) ke dalam larutan memiliki peranan dalam mengubah material dari partikel padat selama geopolimerisasi.

Reaksi-reaksi pada Persamaan 2.1, 2.2 dan Gambar 2.11 dapat dijabarkan dalam mekanisme reaksi kimia berikut.

1. Pembubaran (*dissolution*) atom-atom Si dan Al dari sumber bahan melalui aksi ion hidroksida.

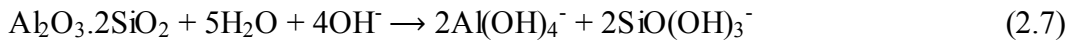
Reaksi pada tahap ini disebut dengan reaksi hidrolisis alkalin dimana material sumber aluminosilikat dipecah oleh larutan alkali. Reaksi berlangsung cepat pada pH tinggi dan secara cepat menghasilkan grup Al-OH dan Si-OH atau sering dikenal dengan jenis aluminat dan silikat.



Reaksi disolusi dari sumber SiO_2 dan Al_2O_3 dapat dijabarkan sebagai berikut (Tennakon dkk, 2014).

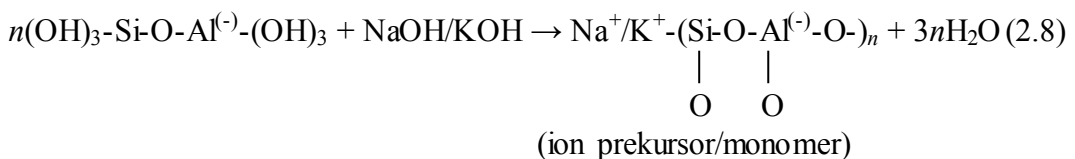


Secara termodinamika, reaksi kimia awal dari pembubaran (*dissolution*) Si dan Al dari sumber aluminosilikat (metakaolin) membentuk grup Si-OH dan Al-OH dapat dituliskan pada Persamaan 2.7 (Zhang dkk, 2013).



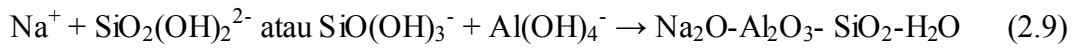
2. Transportasi atau orientasi atau kondensasi ion prekursor menjadi monomer.

Pada tahap selanjutnya grup aluminat dan silikat membentuk ion prekursor menjadi monomer dalam keadaan larutan aluminosilikat super jenuh yang selanjutnya akan terbentuk oligomer pada fase cair melalui proses pembentukan gel (*gelation*).



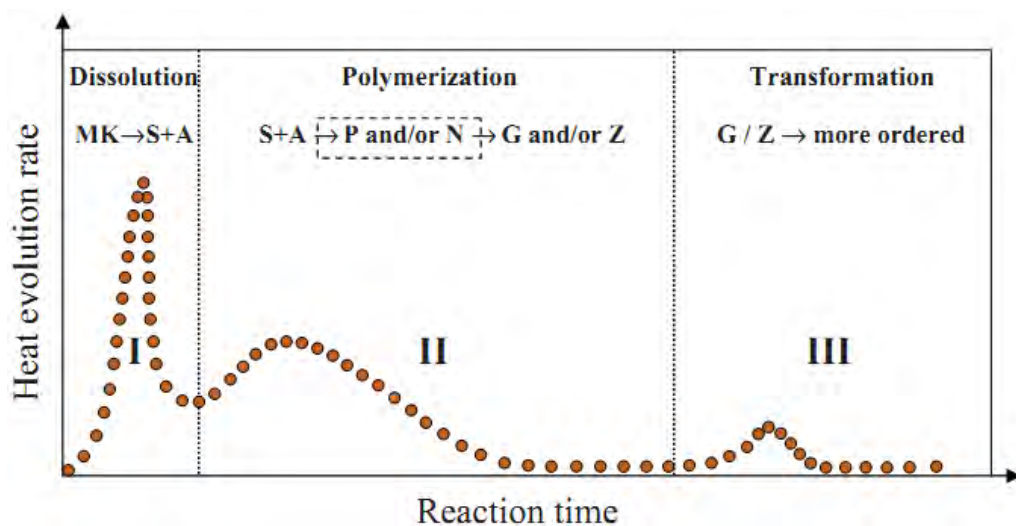
Dalam larutan aluminosilikat jenuh menyebabkan pembentukan gel, sebagai oligomer dalam fase berair membentuk jaringan besar melalui kondensasi. Proses ini melepaskan sejumlah air yang dikonsumsi selama pembubaran. Dengan demikian, air memainkan peran media reaksi, tetapi berada dalam pori-pori pada gel.

Reaksi kondensasi dari spesies silikat dan aluminat (Tennakon dkk, 2014) menjadi sebagai berikut.



3. Pengaturan atau polikondensasi/polimerisasi monomer ke dalam struktur polimer.

Setelah gelas sistem terus berlangsung untuk mengatur ulang dan mereorganisasi, sebagai peningkatan konektivitas jaringan gel, sehingga terbentuk jaringan aluminosilikat tiga dimensi yang kemudian dikenal dengan geopolimer.



Gambar 2.12 Skema Kinetika Sintesis Geopolimer dengan Aktivasi NaOH dari Metakaolin (Zhang dkk, 2012)

Berdasarkan harga entalpi reaksi, geopolimerisasi berlangsung dalam tiga tahap sebagaimana dilihat pada Gambar 2.12. Secara ringkas Gambar 2.12 menjelaskan bahwa pada tahap I terjadi pembubaran (*dissolution*) sumber aluminosilikat (metakaolin) menjadi monomer silikat (S) dan aluminat (A). Pada tahap II, reaksi polimerisasi S dan A menghasilkan oligomer aluminosilikat (O) yang dengan segera menjadi fragmen kecil geopolimerik (P) dan *nucleus* proto-zeolitik (N). Proses reaksi ini berlanjut menjadi gel polimer anorganik (G) dan membentuk fase kristal (Z). Pada tahap III, terjadi transformasi dari fase G/Z menjadi fase yang lebih stabil.

2.4.4 Sifat dan Karakteristik Geopolimer

Material geopolimer memiliki karakteristik yang berbeda dengan material OPC (*Ordinary Portland Cement*). Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Perbandingan antara Binder OPC (*Ordinary Portland Cement*), MPCs (*Magnesium Phosphat Cements*), dan Geopolimer

Perbandingan Karakteristik Fisik Khas (desain campuran khusus akan menghasilkan hasil yang berbeda)			
	OPC	MPCs	Geopolymers
Kuat tekan dalam Psi	3000-7000	8000-12000	5000-16000
Kuat tarik lentur dalam Psi	250-1000	900-1700	300-2900
Toleransi pH	6.5-14	3-11	3-14
Toleransi garam (paparan lanjut)	Tidak	Ya	Ya
Suhu struktur maksimal	1500 °F	2300 °F	2000-2700 °F
Waktu <i>curing</i> (<i>Demolding</i>)	1-2 hari	10 menit-2 jam	3 jam-3 hari
Waktu <i>curing</i> (kekuatan tinggi)	28 hari	3 hari	3 hari
Rentang suhu <i>curing</i>	1500 °F	1500 °F	1500 °F
Pengikatan diri	Tidak	Ya	Ya
Pengikatan untuk penguatan	Tidak	Ya	Ya
Menyusut setelah pengeringan	Ya	Tidak	Tidak
Koefisien pemuaian termal	0.000012	0.00000017	~0.000001
Penyerapan air	Ya	Tidak	Tidak
<i>Foamable</i>	Ya	Ya	Ya

Sumber: Sonafrank, 2010

Beberapa sifat material geopolimer adalah sebagai berikut (De Weerd, 2011):

- Ketahanan terhadap asam. Geopolimer telah terbukti memiliki sifat tahan asam yang lebih baik daripada pasta semen Portland biasa. Memburuknya ketahanan sampel OPC dalam lingkungan asam berkaitan dengan kandungan kalsium yang tinggi, baik sebagai $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atau CSH dari rasio molar tinggi C/S. Mekanisme penurunan geopolimer dalam lingkungan asam dikaitkan dengan penggantian kation (Na, K) dengan proton atau hidronium (H^+ dan H_3O^+), dan proses dealuminasi dari gel geopolimer.
- Ketahanan terhadap reaksi alkali-aggregate. Material geopolimer yang dihasilkan dari abu layang teraktivasi kurang rentan terhadap reaksi alkali dibandingkan OPC. Hal ini karena tidak adanya kalsium dalam sistem

geopolimer yang menghasilkan produk alkali-aggregat reaction (AAR) yang kurang ekspansif.

- c. Ketahanan terhadap kenaikan temperatur. Geopolimer diketahui memiliki peningkatan perlawanan terhadap suhu yang semakin tinggi dibandingkan dengan pengikat dari semen Portland. Hal ini berkaitan dengan fakta bahwa air yang ada dalam gel aluminosilikat tidak terikat secara struktural, berbeda dengan air yang ada dalam kalsium silikat hidrat yang terbentuk selama hidrasi semen Portland. Kandungan tinggi natrium silikat dan alkali tak terikat berperan pada pembengkakan (pembentukan fase cair) dapat terjadi pada temperatur yang lebih tinggi.
- d. Imobilisasi limbah berbahaya dan limbah radioaktif. Geopolimer telah terbukti dapat melumpuhkan bahan berbahaya seperti timah, boron dan arsen. Dua unsur terakhir tidak dapat distabilkan dalam sistem semen Portland karena mereka cenderung untuk memperlambat atau bahkan menghambat hidrasi semen. Imobilisasi ini dikaitkan dengan fakta bahwa unsur-unsur tersebut merupakan bagian dari struktur yang solid. Tampaknya geopolimer bertindak seperti zeolit dalam mempertahankan kation tertentu.
- e. Kekuatan dan permeabilitas. Kekuatan dan permeabilitas material geopolimer bergantung pada desain campuran dari geopolimer, seperti rasio Si/Al, konsentrasi alkali, rasio air dengan padatan, dan penggunaan natrium silikat serta reaktivitas komponen (misalnya metakaolin dan *fly ash*).
- f. Karbonasi dan korosi. Mortar fly ash teraktifasi telah terbukti mampu untuk pasifasi tulangan baja dengan tingkat yang sama seperti mortar semen Portland, namun stabilitas pasifasi dalam perubahan kondisi lingkungan (misalnya kelembapan) tampaknya sangat bergantung pada aktivator yang digunakan. Pengaruh klorida pada tingkat korosi tulangan ini serupa untuk mortar geopolimer dan mortar semen Portland. Karbonasi semen dan beton geopolimer sangat lambat dalam kondisi basah, tapi akan cepat dalam kondisi kering. Karbonasi ini dapat mengakibatkan penurunan tingkat pH dan karena itu dapat memperlambat laju reaksi dan sebagai konsekuensi juga pengembangan kekuatan.

- g. Reologi. *Workability* material geopolimer sangat bergantung pada jenis sumber aluminosilikat yang digunakan. Misalnya, *fly ash* memiliki kebutuhan air yang lebih rendah dibandingkan metakaolin. Selain itu, jenis dan konsentrasi activator yang digunakan juga berpengaruh pada sifat *workability* geopolimer.
- h. Stabilitas volume. Stabilitas volum berkaitan dengan penyusutan karena proses pengeringan secara kimia. Hal ini berkaitan dengan kebutuhan air yang tinggi dari material geopolimer untuk mencapai *workability* dan jumlah air yang terbatas ini dianggap sebagai ikatan secara kimia. Oleh karena itu, banyaknya air dalam gel aluminosilikat dapat dilepaskan dari waktu ke waktu yang lebih lama setelah pengeringan pada suhu kamar.
- i. Kelebihan ekologis. Secara nyata, keuntungan ekologis dari material geopolimer adalah bahwa material geopolimer dapat dibuat dari sisa produk industri (misalnya *fly ash* atau limbah pertambangan). Hal ini menghindari dumping atau penumpukan di tempat pembuangan sampah.

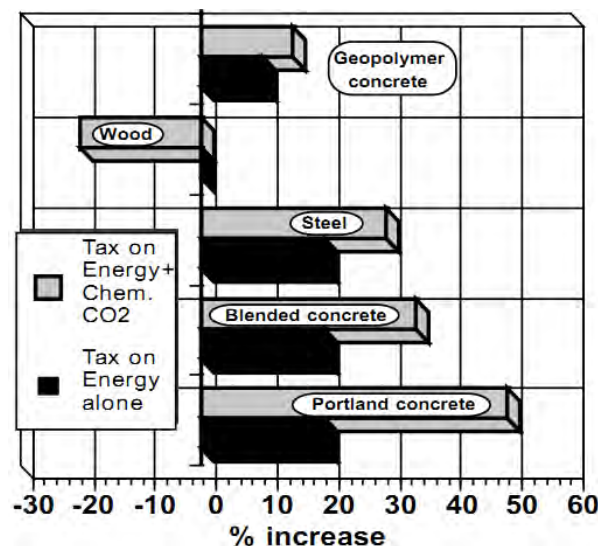
2.4.5 Aplikasi Geopolimer

Geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan (*shrinkage*) yang rendah, *freeze-thaw resistance*, ketahanan terhadap sulfat, ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap asam, ketahanan terhadap api, dan reaksi agregat alkali yang tidak berbahaya. Selain itu, sampel geopolimer yang diaktivasi menggunakan natrium hidroksida jauh lebih stabil kekuatannya dibandingkan dengan yang diaktivasi oleh natrium silikat. Dimana fase zeolite hadir bersama fase alkali alumino silikat amorf dalam abu terbang yang diaktivasi oleh natrium silikat hanya terdapat fase alkali alumino silikat amorf.

Material geopolimer memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

1. Mengurangi kebutuhan semen Portland dan memungkinkan penurunan terjadinya pengembangan emisi global CO₂ yang signifikan.
2. Menggunakan bahan limbah sebagai bahan baku utama (misalnya *fly ash*, tailing tambang, limbah kimia industri, dan terak).
3. Mengurangi polusi dan biaya produksi.
4. Meningkatkan umur desain infrastruktur.

5. Membuka peluang untuk proses dan perbaikan produk yang mengambil keuntungan dari sifat unik geopolimer.



Gambar 2.13 Perkiraan Kenaikan atau Penurunan Biaya Produksi untuk Bahan Bangunan, karena Direncanakan Eco-pajak atas Energy atau Emisi CO₂ yang Sebenarnya (energi + Kimia CO₂) (Davidovits, 1994)

Aplikasi material geopolimer terutama sebagai bahan pembuatan beton memiliki biaya yang rendah dalam aspek energi dan emisi gas CO₂ sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.13. Gambar 2.13 menampilkan estimasi untuk penggunaan beton berbasis semen Portland (kenaikan 50% dalam biaya), untuk dibandingkan dengan bahan lain seperti baja (kenaikan 30%), kayu (20% penurunan) dan beton berbasis semen geopolimer (kenaikan 15%).

Geopolimer dapat diaplikasikan pada berbagai lapangan industri seperti automobile, *aerospace*, metalurgi dan pengecoran bukan besi, teknik sipil dan industri plastik. Tipe dari aplikasi material-material geopolimer ditentukan oleh struktur kimia dalam hal ini adalah rasio atom Si/Al dalam polisialat, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2.8. Rasio Si/Al yang rendah seperti 1, 2, dan 3 menginisiasi jaringan 3-D yang sangat kaku. Sementara rasio Si/Al yang lebih besar dari 15 menghasilkan karakter polimer dari materil geopolimer tersebut.

Tabel 2.8 Aplikasi-aplikasi Geopolimer Berdasarkan Rasio Si/Al

Rasio Si/Al	Aplikasi
1	Bata Keramik Pelindung kebakarn/api
2	Semen dan beton rendah CO ₂ Enkapsulasi limbah beracun dan radioaktif
3	Komposit <i>fiberglass</i> perlindungan kebakaran/api Peralatan pengecoran Komposit tahan panas, 200 °C to 1000 °C Perkakas untuk proses titanium dirgantara
> 3	Sealants untuk industri, 200 °C to 600 °C Perkakas untuk dirgantara aluminium SPF
20 – 35	Komposit tahan panas dan api

Sumber: Davidovits, 2011

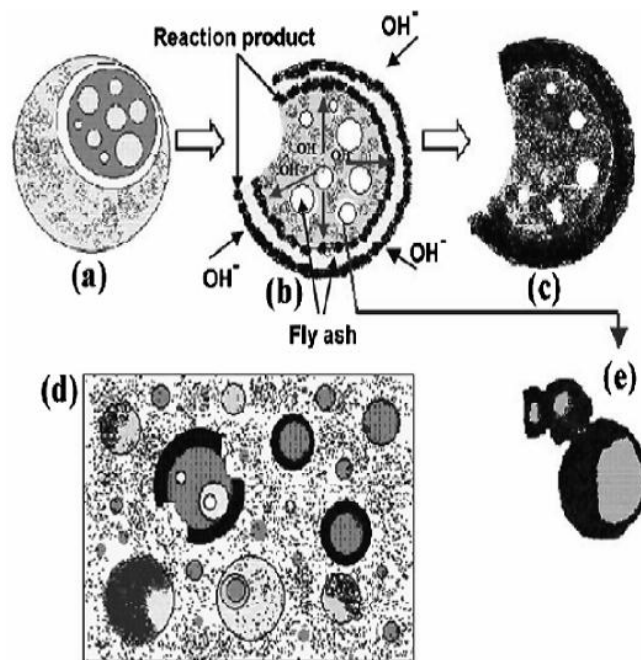
Selain aplikasi di atas, beberapa aplikasi geopolimer berdasarkan bidang aplikasi adalah sebagai berikut.

- Resin geopolimer dan pengikat, meliputi bahan tahan api, isolasi termal, busa; keramik ubin low-energi, refraktori item, refraktori *thermal shock*; system resin high-tech, cat, pengikat dan grouts; bioteknologi (bahan untuk aplikasi obat); industri pengecoran (resin), perkakas untuk pembuatan komposit serat organik; komposit untuk infrastruktur perbaikan dan penguatan, komposit serat karbon tahan api berteknologi tinggi dan tahan panas untuk interior pesawat dan mobil; dan penampungan limbah radioaktif dan beracun.
- Semen geopolimer dan beton, meliputi bahan bangunan berteknologi rendah (batu bata), dan semen rendah CO₂ dan beton;
- Seni dan arkeologi, meliputi artefak batu dekoratif, seni dan dekorasi; dan warisan budaya, arkeologi dan sejarah ilmu.

2.5 Larutan Aktivator

Larutan aktivator merupakan larutan yang sangat berperan dalam proses geopolimerisasi. Pada reaksi geopolimerisasi, larutan aktivator memecah bahan aluminosilikat menjadi monomer silikat dan aluminat. Mekanisme pembubabaran (*dissolution*) bahan aluminosilikat dapat dilihat pada Gambar 2.14. Aktivasi alkali

memecah bahan aluminosilikat dalam lingkungan pH yang tinggi dan terjadi pada kondisi larutan (sintesis melalui larutan).

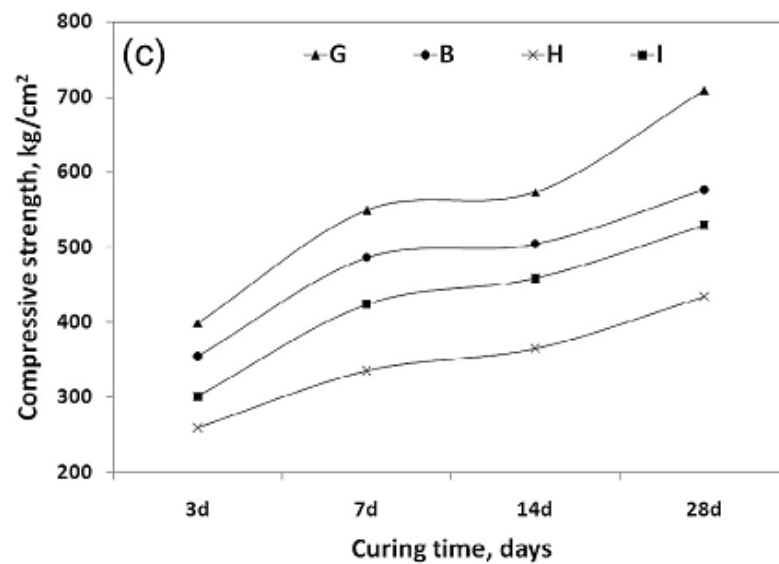


Gambar 2.14 Mekanisme Aktivasi Alkali dari Abu Layang (Abdullah dkk, 2011)

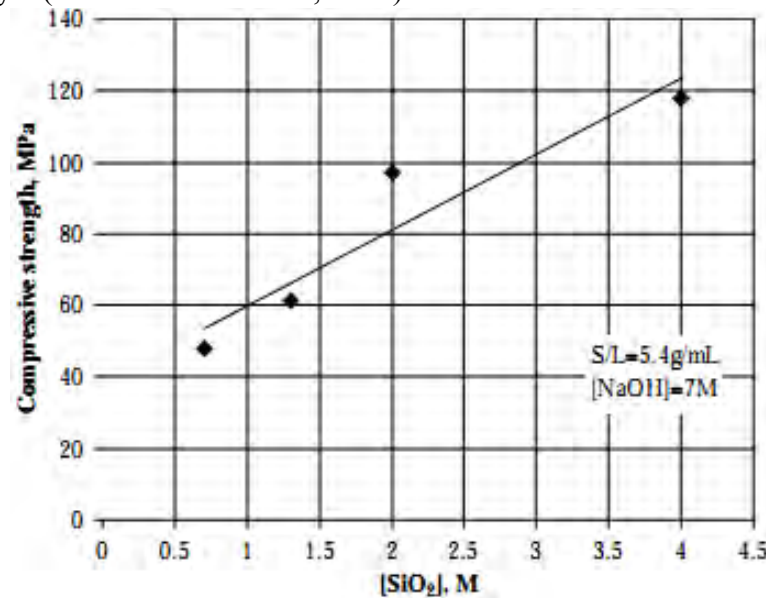
Larutan aktivator yang sering digunakan adalah natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dengan natrium silikat atau kalium silikat (Deb dkk, 2014; Sakkas dkk, 2014; Yang dkk, 2014; Zhu dkk, 2013; dan Maragkos dkk, 2009). Namun, secara umum adalah aktivator basa yang mengandung alkali hidroksida, silikat, aluminat, karbonat atau sulfat, atau kombinasi daripadanya. Abdel-Gawwad (2014) melakukan penelitian pembuatan serbuk semen geopolimer menggunakan aktivator natrium hidroksida yang dicampur dengan kalsium karbonat untuk membentuk serbuk aktivator.

Jenis aktivator yang digunakan dalam mekanisme geopolimerisasi tentu akan berpengaruh pada sifat-sifat geopolimer, terutama sifat mekanik. Sintesis geopolimer dengan menggunakan larutan NaOH dengan natrium silikat cenderung memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi dibandingkan dengan aktivator NaOH dengan kalsium karbonat. Gambar 2.15 menunjukkan peningkatan kuat tekan geopolimer dengan meningkatnya *curing time* selama 28 hari. Disamping itu, komposisi material juga mempengaruhi dimana sampel geopolimer G (NaOH =

4%, $\text{CaCO}_3 = 5\%$, dan GBFS = 91%) memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi dengan rasio W/C adalah 0,27. Akan tetapi, nilai ini jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan geopolimer yang disintesis menggunakan NaOH dengan natrium silikat, sebagaimana dilihat pada Gambar 2.16. Artinya, kuat tekan geopolimer yang diaktivasi dengan NaOH dan natrium silikat hampir dua kali dari geopolimer yang diaktivasi dengan NaOH dengan kalsium karbonat.

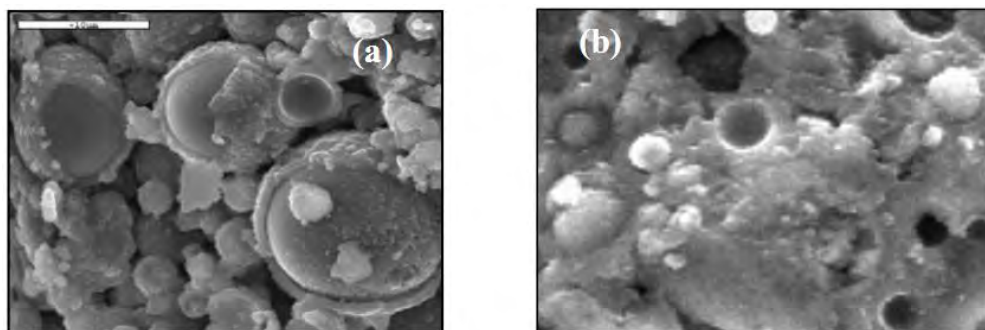


Gambar 2.15 Kuat Tekan Geopolimer dengan Perbedaan Komposisi Material Penyusunnya (Abdel-Gawwad dkk, 2014)



Gambar 2.16 Hubungan Kuat Tekan Geopolimer dengan Konsentrasi SiO_2 (Maragkos dkk, 2009)

Berdasarkan Gambar 2.16 diketahui bahwa nilai kuat tekan geopolimer meningkat dengan meningkatnya konsentrasi SiO_2 (dalam molar), dimana konsentrasi NaOH optimum dan rasio padat/cair (*S/L ratio*) masing-masing adalah 7 molar dan 5,4 g/mL. Selain itu, dengan atau tanpa natrium silikat juga dapat mempengaruhi material geopolimer yang dihasilkan, terutama mikrostrukturnya. Adanya natrium silikat dalam larutan aktivator mengakibatkan struktur geopolimer lebih padat dibandingkan tanpa natrium silikat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.17.



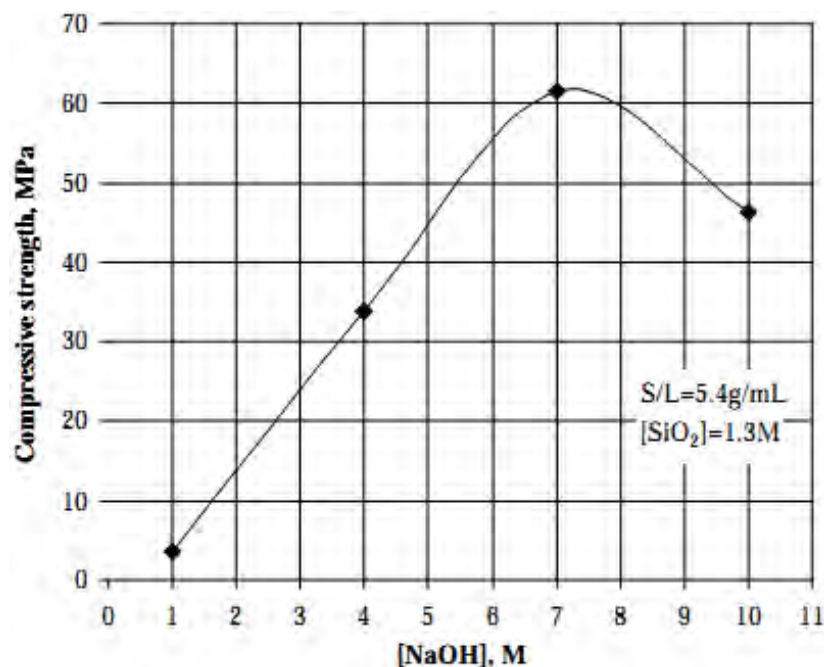
Gambar 2.17 Abu Layang yang Diaktivasi dengan (a) 8 M Larutan NaOH; (b) Campuran Larutan NaOH + Natrium Silikat (Palomo dan Fernández-Jiménez, 2011)

2.5.1 Natrium Hidroksida

Natrium hidroksida (NaOH) merupakan suatu basa kuat yang sangat mudah larut dalam air. Senyawa ini biasa disebut sebagai soda kaustik, atau soda api karena sifatnya yang terasa panas dan licin jika terkena kulit. NaOH banyak digunakan didalam laboratorium kimia adalah untuk reagen sumber ion hidroksida, OH^- . Hal ini berdasarkan pertimbangan bahwa basa NaOH sangat mudah larut.

Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan NaOH pelet dalam air. Massa NaOH padatan dalam larutan bervariasi tergantung pada konsentrasi yang dibutuhkan untuk membuat larutan tersebut. Hal ini karena konsentrasi larutan NaOH juga berpengaruh pada sifat-sifat geopolimer, baik mekanik maupun mikrostruktur geopolimer itu sendiri. Konsentrasi NaOH yang semakin meningkat cenderung meningkatkan kuat tekan material geopolimer. Namun, pada kondisi

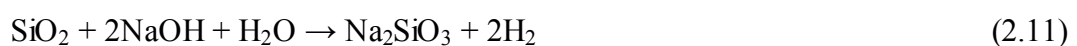
tertentu justru kuat tekan menurun dengan meningkatnya konsentrasi NaOH (Maragkos dkk, 2009) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.18. Gambar 2.18 memberikan informasi bahwa untuk menghasilkan kuat tekan yang optimum maka konsentrasi NaOH yang paling baik adalah 7 molar. Konsentrasi NaOH dari 7 molar hingga 10 molar cenderung menurunkan kuat tekan produk geopolimer. Mikrostruktur produk geopolimer menyerupai material kristal dengan peningkatan konsentrasi NaOH, disamping peningkatan rasio $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ juga berpengaruh pada peningkatan kuat tekannya (Muduli dkk, 2013).



Gambar 2.18 Hubungan Antara Kuat Tekan dengan Konsentrasi NaOH (Maragkos dkk, 2009)

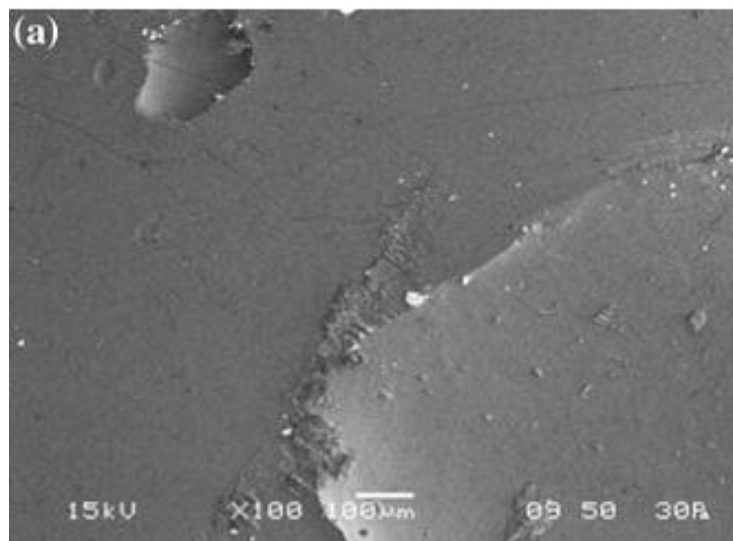
2.5.2 Natrium Silikat

Natrium silikat merupakan nama lain dari *waterglass* dengan rumus kimia Na_2SiO_3 . Na_2SiO_3 dapat diproduksi atau disintesis pasir silika menggunakan natrium karbonat atau natrium hidroksida menurut reaksi berikut.

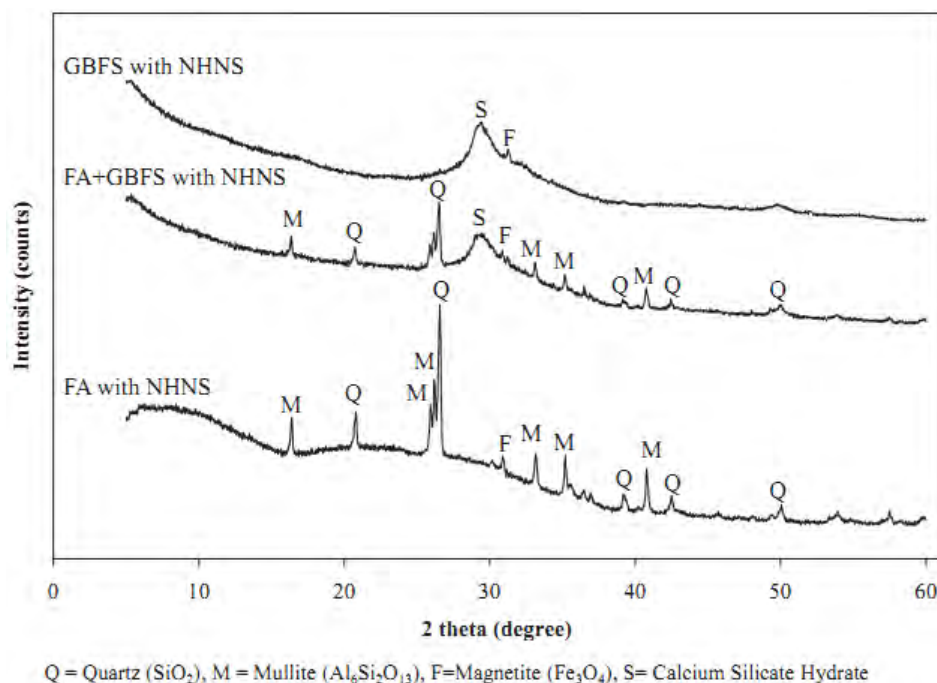


Natrium silikat atau kaca alkali silikat berupa kristal putih yang dapat larut dalam air (soluble glass) menghasilkan larutan alkalin. Natrium silikat selalu

stabil dalam larutan murni dan alkalin. Dalam larutan asam, ion silikat bereaksi dengan ion hidrogen untuk membentuk asam silikat, yang bila dipanaskan dan dibakar akan membentuk silika gel yang keras, bening seperti zat kaca yang dapat menyerap air dengan cepat.



Gambar 2.19 Hasil SEM dari Gel Natrium Silikat dengan Rasio Molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 5$ (Dimas dkk, 2009)



Gambar 2.20 XRD Pasta Geopolimer dengan NHNS (Phoo-ngernkham dkk, 2015)

Sebagaimana NaOH, natrium silikat juga memiliki peran dalam proses geopolimerisasi. Hal ini berpengaruh juga pada sifat-sifat geopolimer yang dihasilkan. Gambar 2.19 menunjukkan gambaran mikrostruktur gel natrium silikat dengan rasio molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ adalah 5. Dua fase yang terbentuk selama polikondensasi terjadi pada tahap utama adalah fase polimer amorf yang terdiri dari matriks keseluruhan material. Tahap kedua fase natrium silikat hidrat dalam bentuk endapan diaglomerasi dengan ukuran mulai dari 500 nm sampai 40 μm (Dimas dkk, 2009).

Penggunaan larutan aktivator NaOH dengan Na_2SiO_3 (NHNS) untuk menghasilkan geopolimer sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.20 memperlihatkan bahwa pasta *fly ash* (FA) terdiri dari fase *glass* seperti yang ditunjukkan oleh puncak di $28-35^\circ 2\theta$ dan fase kristal kuarsa, *mullite* dan magnetit tanpa *hydrosodalite*. Kekuatan datang terutama dari gel NASH dan kekuatan yang diperoleh relatif tinggi setelah 28 hari dari 42,8 MPa. Untuk FA + *granulated blast furnace slag* (GBFS) yang ditambahkan dengan NHNS, *calcium silicate hydrate* (CSH) tambahan dibentuk dengan mengurangi jumlah kuarsa dan *mullite*. CSH tambahan berperan pada peningkatan kekuatan yang tinggi dan kuat tekan 114,5 MPa setelah 28 hari. Untuk GBFS yang disisipkan dengan NHNS, pola XRD menunjukkan sejumlah besar fase amorf dengan CSH tambahan dan hanya sejumlah kecil magnetit (dari GBFS) (Phoo-ngernkham dkk, 2015). Dengan demikian, dalam sintesis material geopolimer, baik sebagai semen maupun sebagai campuran beton, larutan NaOH dan Na_2SiO_3 memiliki peranan yang sangat penting. Hal ini karena kedua larutan tersebut merupakan fungsi utama dalam proses geopolimerisasi material sumber aluminosilikat menjadi produk geopolimer.

~halaman ini sengaja dikosongkan~

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Bahan dan Alat

3.1.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

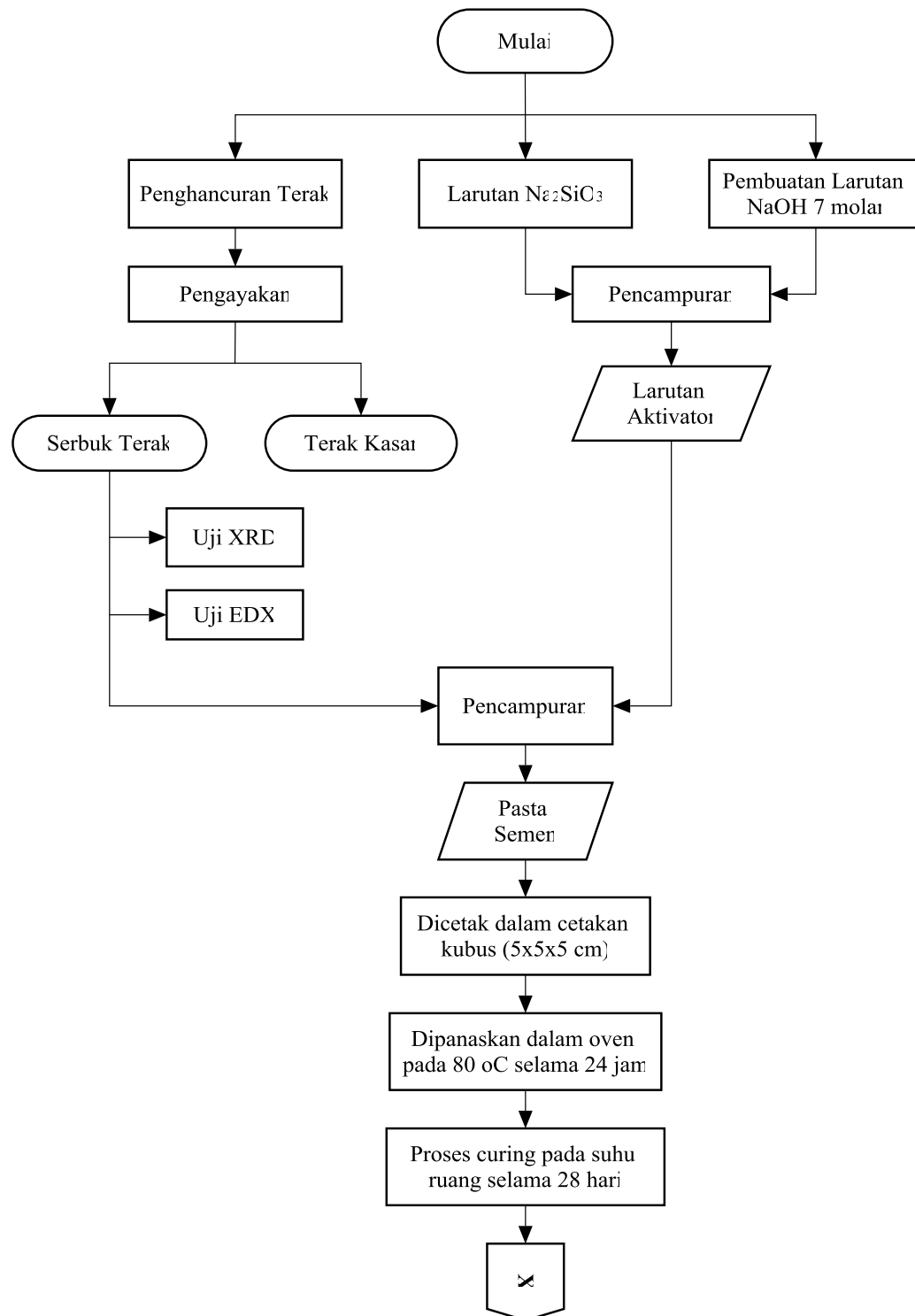
1. Terak feronikel. Terak yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil sampling dari pengolahan feronikel dari mineralnya di Laboratorium Ekstraksi Teknik Material dan Metalurgi.
2. Natrium hidroksida (NaOH). NaOH yang digunakan dalam penelitian ini adalah NaOH dalam bentuk serbuk.
3. Natrium Silikat (Na_2SiO_3) Merck. Na_2SiO_3 yang digunakan dalam bentuk larutan *extra pure* dengan komposisi 7,5-8,5% NaO , dan 25,5-28,5% SiO_2 .
4. Aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$). $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang digunakan dalam penelitian ini dalam bentuk serbuk.
5. Aquadest

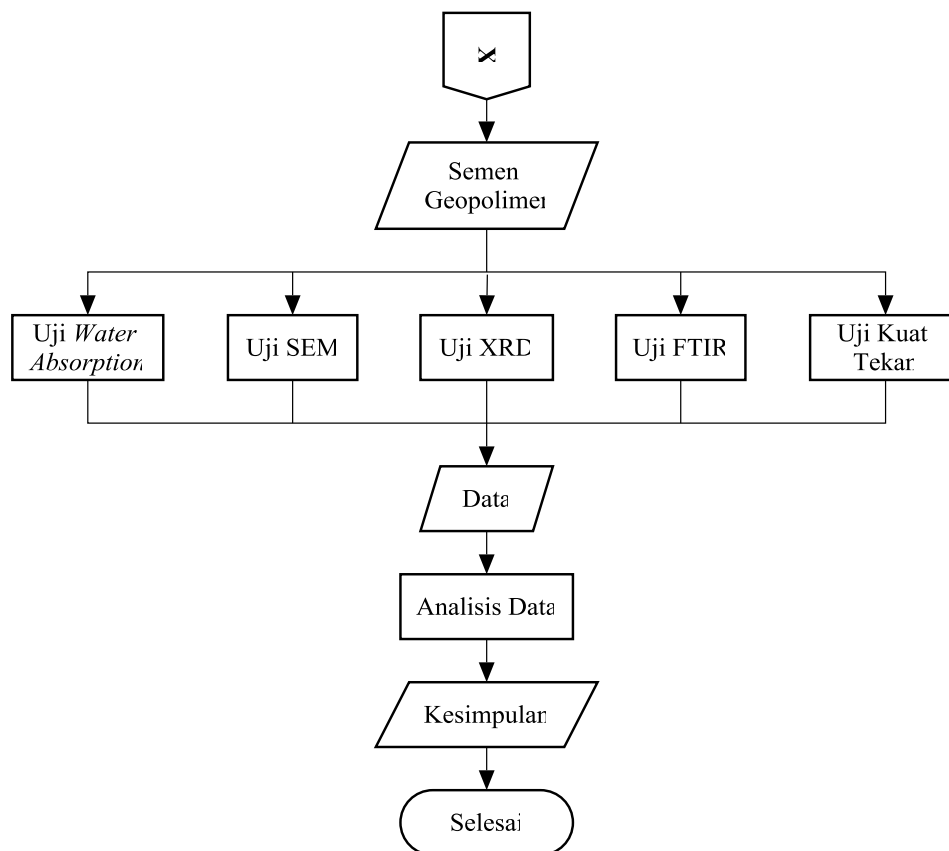
3.1.2 Alat-alat

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Timbangan digital
2. Gelas kimia
3. Spatula
4. *Crusher*, untuk menghancurkan bahan baku
5. Ayakan (*sieve*) untuk mengayak material
6. Cetakan logam kubus
7. Kompaksi manual
8. Hand mixer
9. Wadah *non absorbent surface*, untuk membuat pasta semen.
10. Oven

3.2 Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Penghancuran Material

Terak dihancurkan menggunakan lumping besi hingga ukuran tertentu. Kemudian diayak untuk memperoleh serbuk terak yang ukurannya hampir sama dengan serbuk semen. Pada penelitian ini, ukuran serbuk terak yang digunakan adalah ≥ 200 mesh. Setelah itu, serbuk terak dikarakterisasi menggunakan SEM EDX dan XRD untuk mengetahui komposisi kimianya.

3.3.2 Pembuatan Larutan Aktivator

Larutan aktivator dibuat dengan mencampurkan larutan NaOH 7 molar dengan larutan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) dengan rasio volum antara Na_2SiO_3 dengan NaOH adalah 2,5.

Pembuatan larutan NaOH 7 M dari padatan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan volume larutan yang dibutuhkan (dalam mL)

2. Menentukan massa NaOH yang dibutuhkan (dalam gram) menggunakan persamaan berikut.

$$Massa NaOH = \frac{Konsentrasi (M)}{Mr NaOH \times Volume} \quad (3.1)$$

3. Melarutkan NaOH padatan kedalam air hingga volume mencapai yang ditentukan.

Kebutuhan volume larutan aktivator yang digunakan adalah 157 mL dengan komposisi 44,97 mL larutan NaOH dan 112,4 mL larutan Na₂SiO₃ (Lampiran 3).

3.3.3 Sintesis Semen Geopolimer

Sintesis dan preparasi semen geopolimer dilakukan dengan langkah-langkah berikut.

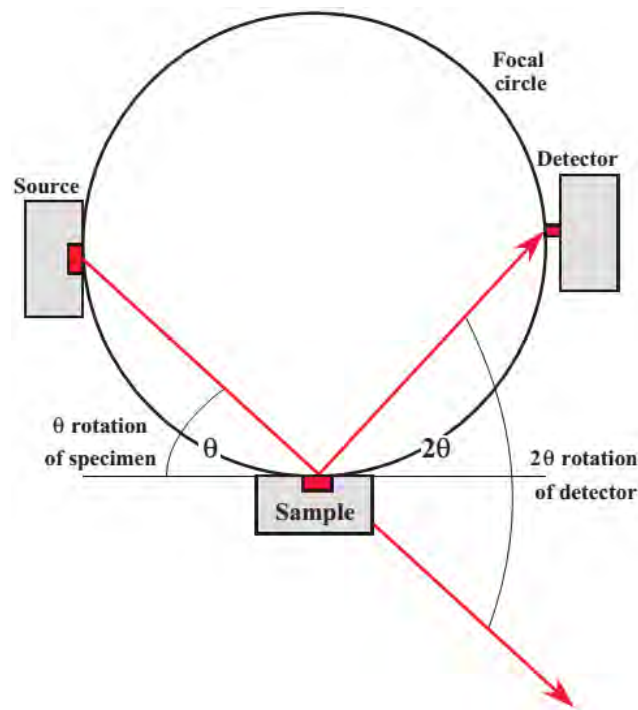
1. Mencampurkan larutan aktivator dengan terak feronikel yang telah dihancurkan dalam wadah yang halus (*non absorbent surface*) dengan rasio solid/liquid (S/L) = 5,4 gr/mL. Proses pencampuran menggunakan *hand mixer* selama 5 menit dengan 1200 rpm.
2. Dicetak menggunakan cetakan kubus dengan dimensi 5x5x5 cm³ dengan dilakukan kompaksi secara manual agar spesimen yang dicetak tidak terdapat gelembung gas yang terjebak yang dapat memungkinkan kepadatan yang kurang baik.
3. Spesimen dipanaskan dalam oven pada 80 °C selama 24 jam.
4. Spesimen dibiarkan pada temperatur ruang selama 28 hari untuk proses pengerasan lebih lanjut.

3.4 Pengujian

3.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Sebuah difraktometer sinar-X terdiri dari sumber sinar-X, generator sinar-X, pengumpul (assembly) difraktometer, perakitan detektor dan pengumpulan data sinar-X dan sistem pengolahan. Pengumpul difraktometer mengontrol keselarasan *beam*, serta posisi dan orientasi dari spesimen dan detektor sinar-X. Terdapat tiga faktor penentu apakah sebuah bidang kristal tertentu akan

memberikan puncak difraksi atau tidak. Ketiga faktor tersebut yaitu panjang gelombang sinar-X dalam *incident beam*, sudut antara *incident beam* dengan respek terhadap kristal, dan ukuran efektif dari titik-titik kisi resiprokal (Brandon dan Kaplan, 2008).



Gambar 3.2 Mekanisme Pengujian Sampel dalam Geometri Bragg-Brentano (Barndon dan Kaplan, 2008)

Spektrum X-ray biasanya direkam dengan memutar detektor X-ray tentang sampel, dipasang di atas goniometer difraktometer. Goniometer memungkinkan sampel yang akan diputar sekitar satu atau lebih sumbu (Gambar 3.2). Dalam rangka untuk membuat penggunaan penuh metode resolusi potensial (ditentukan oleh ketajaman puncak difraksi), difraktometer harus akurat selaras dan dikalibrasi, biasanya untuk lebih baik dari $0,01^\circ$. Posisi yang akurat dari sampel sangat penting, terutama ketika menggunakan monokromator membungkuk dalam difraktometer berfokus.

X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi secara kualitatif dan kuantitatif senyawa atau fase yang terdapat pada specimen dengan menggunakan alat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3. Prinsip kerja dari

peralatan ini adalah dengan menembakan sinar-X dengan panjang gelombang tertentu dari berbagai arah sudut penembakan kepada spesimen, kemudian pantulan sinar-X tadi ditangkap oleh spesimen dan selanjutnya dikonversi menjadi data output berupa grafik 2θ versus intensitas. Setiap fase memiliki nilai 2θ -nya masing-masing. Untuk mengidentifikasi fase-fase yang terbentuk secara kuantitatif adalah dengan mencocokkan puncak-puncak dari grafik hasil pengujian dengan nilai 2θ standar fase dari *database* yang ada.

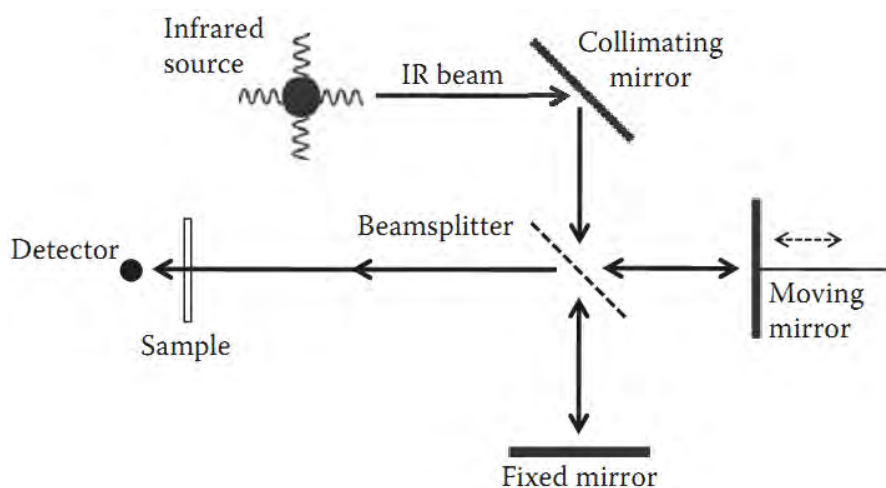


Gambar 3.3 Alat Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

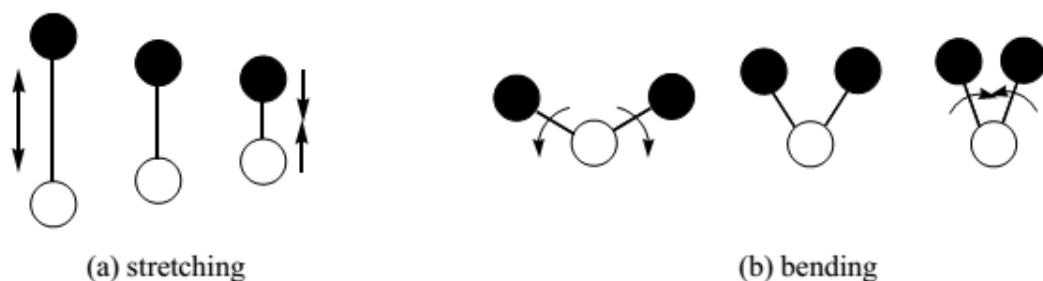
3.4.2 *Fourier Transform InfraRed* (FTIR)

FTIR digunakan untuk mengidentifikasi material spesimen, menentukan kualitas spesimen, dan menentukan jumlah komponen pada spesimen, juga untuk mengetahui ikatan struktur yang terbentuk pada spesimen. Pengujian FTIR ini dimaksudkan untuk mengetahui pergerakan vibrasional dari suatu molekul. Perbedaan pergerakan diantara grup atom yang berbeda menyebabkan perbedaan penyerapan jumlah energi dari molekul tersebut. Dengan kata lain, analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi bagaimana sebenarnya atom-atom berikatan satu dengan yang lain atau bagaimana atom-atom tersebut dikelompokkan dalam suatu molekul.

Skema kerja pengujian FTIR dapat dilihat pada Gambar 3.4. Pada Gambar 3.4 cahaya yang ditransmisikan oleh beamsplitter berjalan menuju cermin tetap, dan cahaya yang dipantulkan oleh beamsplitter berjalan menuju cermin bergerak. Setelah berkas cahaya merefleksikan dari cermin ini kemudian melakukan perjalanan kembali ke beamsplitter, di mana cahaya tersebut digabungkan menjadi sinar cahaya tunggal yang meninggalkan interferometer, berinteraksi dengan sampel, dan menyerang detektor.



Gambar 3.4 Diagram Optik dari Interferometer Michelson (Smith, 2011)



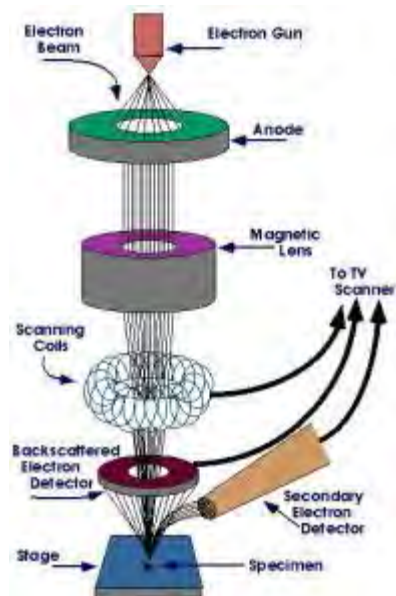
Gambar 3.5 Vibrasi *Stretching* dan *Bending* (Cooke, 2005)

Penyerapan energi yang dihasilkan dalam rentang daerah infrared (IR) yang menunjukkan energi vibrasional suatu molekul yaitu pada rentang 4000-200 cm^{-1} . Pada rentang tersebut terdapat dua tipe vibrasi yang disebabkan penyerapan dalam spektrum IR, yaitu peregangan (*stretching*) dan tekukan (*bending*). *Stretching* melibatkan perpindahan berirama sepanjang sumbu ikatan sehingga

jarak interatomik bergantian meningkat dan menurun. Sementara *bending* melibatkan perubahan sudut ikatan antara dua ikatan dan atom pusat (Gambar 3.5).

3.4.3 Scanning Microscope Electron (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop electron yang menggambar spesimen dengan memindainya menggunakan sinar electron berenergi tinggi dalam scan pola raster. Prinsip kerja dari pengujian SEM ditunjukkan pada Gambar 3.6. Elektron berinteraksi dengan atom-atom sehingga spesimen menghasilkan sinyal yang mengandung informasi tentang topografi permukaan spesimen, komposisi, dan karakteristik lainnya seperti konduktivitas listrik.



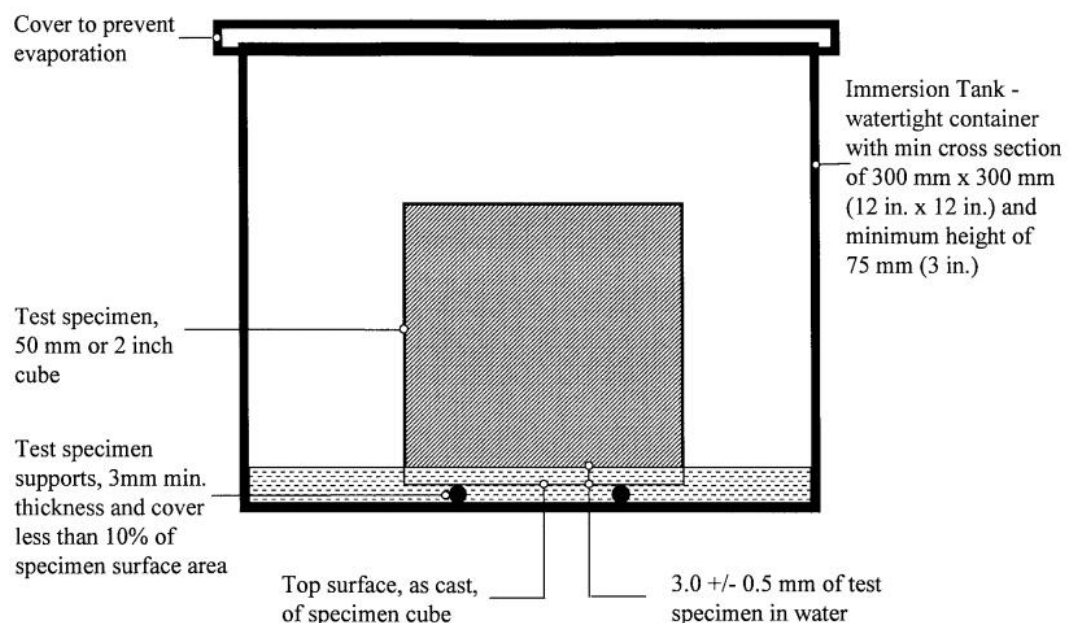
Gambar 3.6 Prinsip Kerja *Scanning Microscope Electron* (SEM)

3.4.4 Penyerapan Air (*Water Absorption*)

Pengujian *water absorption* didasarkan pada ASTM C 1403. Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut.

- a. Menghitung luas permukaan untuk tiap spesimen meliputi panjang dan lebar permukaan uji.

- b. Mencatat berat awal sebagai W_0 dalam gram hingga 0,1 g dari tiap specimen sebelum pengujian.
- c. Tempatkan tangki perendaman pada permukaan datar. Tempatkan semua spesimen dalam tangki perendaman seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.7.
- d. Tambahkan air ke tangki perendaman sehingga spesimen sebagian terendam dalam $3,0 \pm 0,5$ mm ($0,12 \pm 0,02$ in.) air. Tutup tangki perendaman untuk meminimalkan penguapan.



Gambar 3.7 Konfigurasi Spesimen Selama Pengujian Penyerapan Air (ASTM C1403)

- e. Pada 0,25, 1, 4, dan 24 jam, mengukur berat dalam gram hingga 0,1 g tiap spesimen dan catat sebagai W_T dimana T adalah waktu pengukuran dalam jam. Bersihkan air yang terdapat pada permukaan tiap spesimen dengan kain sebelum masing-masing penimbangan.
- f. Setelah masing-masing ditimbang, memindahkan spesimen ke dalam tangki perendaman kembali dan tambahkan air yang diperlukan untuk menjaga kedalaman perendaman seperti ditentukan dalam langkah (d). Menutup kembali tangki perendaman.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung penyerapan air adalah sebagai berikut.

$$A_T = \frac{(W_T - W_0) \times 10000}{(L_1 \times L_2)} \quad (3.2)$$

dengan:

A_T = penyerapan air pada waktu tertentu (dalam gram/100 cm²)

W_T = berat spesimen pada waktu T dalam gram hingga 0,1 g,

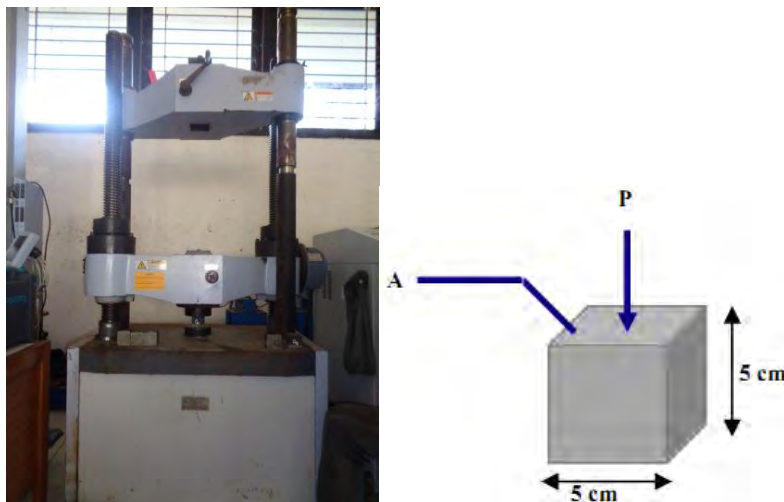
W_0 = berat awal spesimen dalam gram hingga 0,1 g,

L_1 = panjang rata-rata permukaan uji mortar spesimen kubus dalam mm dengan ketelitian 0,5 mm, dan

L_2 = lebar rata-rata permukaan uji mortar spesimen kubus dalam mm dengan ketelitian 0,5 mm

3.4.5 Pengujian Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Adapun pengujian *compressive strength* didasarkan pada ASTM C 109 M. dimensi spesimen adalah bentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm³ (Gambar 3.8).



Gambar 3.8 Alat Uji Tekan dan Spesimen Benda Uji

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur pengerasan 28 hari. Persamaan yang digunakan untuk menentukan kuat tekan adalah sebagai berikut.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

dengan:

f_m = kuat tekan dalam Psi atau MPa,

P = beban maksimum total dalam lbf atau N, dan

A = luasan permukaan yang dibebani dalam inc^2 atau mm^2 .

3.5 Perancangan Penelitian dan Pengujian

Tabel 3.1 Perancangan Penelitian dan Jumlah Spesimen

No.	Variabel X (Rasio Si/Al)	Variabel Y	Rasio Campuran	Kode Spesimen
1	1,5	Sifat Fisik dan Mekanik	Rasio S/L = 5,4 gr/mL	A1, A2, A3, A4, A5, A6
2	2,0			B1, B2, B3, B4, B5, B6
3	2,5			C1, C2, C3, C4, C5, C6
4	3,0			D1, D2, D3, D4, D5, D6
5	3,5			E1, E2, E3, E4, E5, E6
Total Spesimen				30

Tabel 3.2 Pengujian Mikrostruktur dan Sifat Fisik-Mekanik

Kode Spesimen	Pengujian					Ket.
	XRD	FTIR	SEM	Penyerapan Air	Kuat Tekan	
A1, A2, A3				√		√ = sudah diuji
A4, A5, A6	√	√	√		√	
B1, B2, B3				√		
B4, B5, B6	√	√	√		√	
C1, C2, C3				√		
C4, C5, C6	√	√	√		√	
D1, D2, D3				√		
D4, D5, D6	√	√	√		√	
E1, E2, E3				√		
E4, E5, E6	√	√	√		√	

~halaman ini sengaja dikosongkan~

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil sintesis material geopolimer dengan variasi rasio Si/Al. Hasil pengujian yang telah dilakukan diharapkan dapat menjelaskan pengaruh rasio Si/Al dalam campuran pasta geopolimer dengan sifat fisik dan mekaniknya.

4.1 Hasil Pengujian

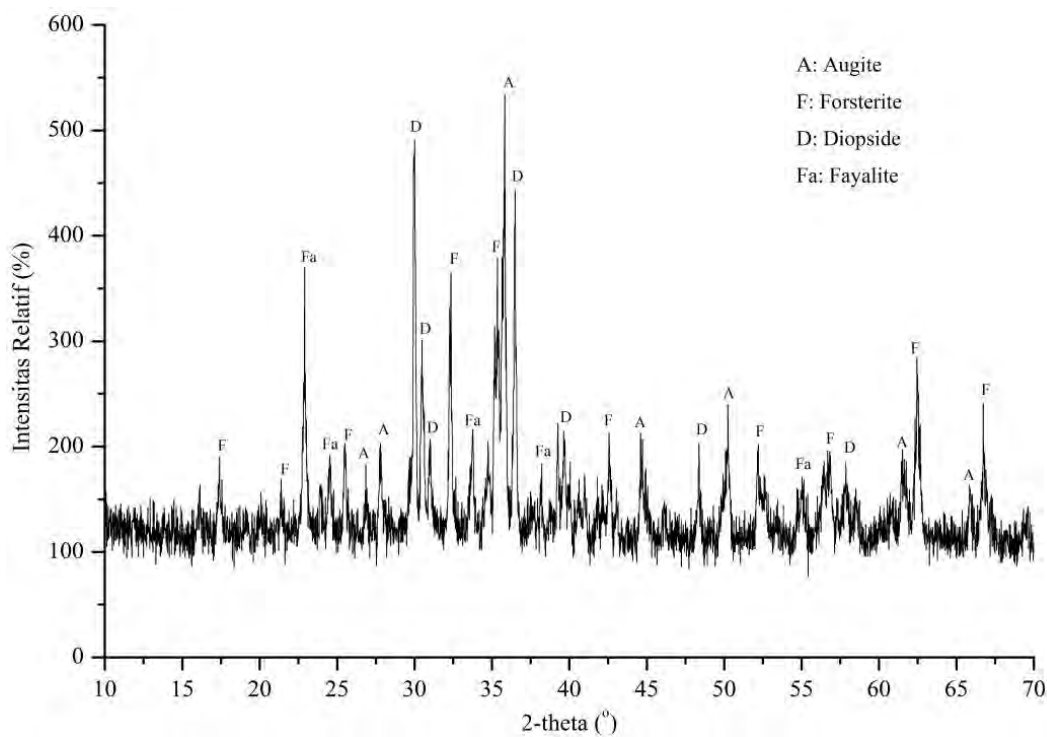
4.1.1 Hasil Pengujian XRD Terak Feronikel

Material dasar yang digunakan untuk sintesis semen geopolimer adalah terak feronikel (*ferronickel slag*) dari hasil pengolahan mineral *laterite* menjadi logam feronikel (FeNi). Karakterisasi awal terak feronikel menggunakan analisis XRD dan EDX untuk mengetahui mineral-mineral dan komposisi kimia yang terkandung dalam terak feronikel tersebut. Hasil pengujian XRD terak feronikel dalam bentuk puncak-puncak sebagaimana terlihat pada Gambar 4.1.

Hasil XRD menunjukkan bahwa intensitas puncak tertinggi adalah mineral *augite* dengan 2θ yaitu $35,82^\circ$ dan $29,95^\circ$ diikuti mineral *diopside*, *fayalite* dan *forsterite* yang masing-masing memiliki puncak tertinggi adalah $36,48^\circ$, $22,94^\circ$ dan $35,37^\circ$. Mineral-mineral tersebut merupakan fase kristal dan juga banyak fase amorf yang terkandung dalam terak feronikel. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya puncak-puncak yang tidak beraturan dalam terak feronikel. Walaupun demikian, senyawa-senyawa dengan fase amorf ini lebih mudah mengalami proses pembubaran (*dissolution*) selama tahap awal dari reaksi geopolimerisasi yang kemudian menghasilkan komponen-komponen reaktif seperti SiO_2 dan Al_2O_3 dalam jumlah yang tinggi. Komponen-komponen ini berperan dalam penggabungan selama fase koagulasi (penggumpalan) dari reaksi geopolimerisasi.

Meskipun memiliki perbedaan dengan bijihnya, proses peleburan bijih logam menyebabkan terak memiliki kumpulan komposisi dan fase kimia yang mirip. Secara umum, terak tersusun oleh beberapa senyawa seperti fase dan kaca silikat, analog sintetik (*synthetic analogues*) dari *pyroxene*, *melilite*, *olivine*,

maupun *spinel*, *sulfide*, dan senyawa intermetalik yang berbeda. Mineral paling dominan yang terkandung dalam terak feronikel merupakan mineral-mineral amorf sumber silikat dan aluminat berupa mineral kompleks yang terdiri dari kelompok *pyroxene* dan *olivine* (Tabel 4.1).



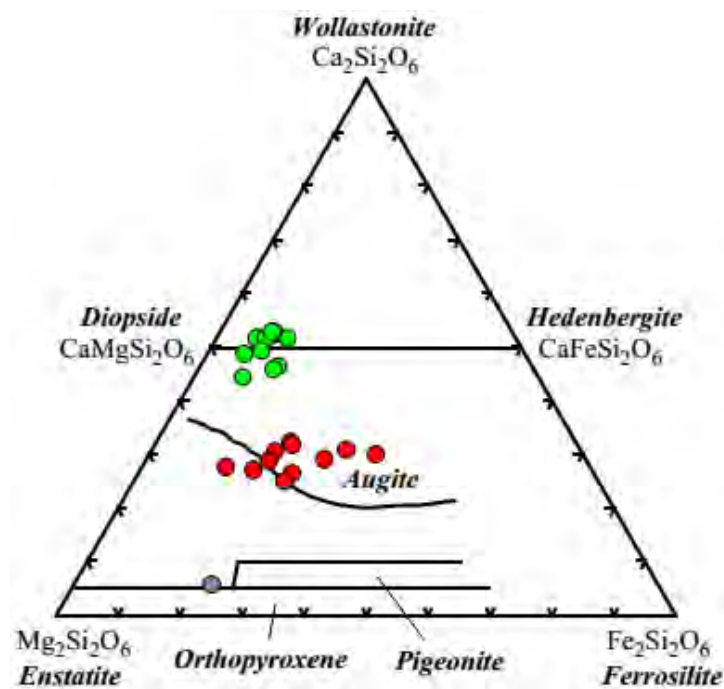
Gambar 4.1 Pola XRD Terak Feronikel

Tabel 4.1 Komposisi Mineral dalam Terak Feronikel

No	Kelompok	Nama Mineral	Formula	Kode Referensi
1	<i>Pyroxene</i>	<i>Augite</i>	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	01-088-0849
		<i>Diopside</i>	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	01-083-1821
2	<i>Olivine</i>	<i>Forsterite</i>	Mg_2SiO_4	00-001-1290
		<i>Fayalite</i>	Fe_2SiO_4	01-071-1668

Kelompok mineral-mineral tersebut merupakan komponen utama yang diperlukan dalam sintesis material geopolimer. Kelompok *pyroxene* dan *olivine* umumnya ditemukan dalam batuan ultrabasa dengan kandungan 30-45% SiO_2 . Kelompok *pyroxene* yang lebih dekat dengan formula kimia tersebut adalah mineral *augite* dan *diopside*. Berdasarkan diagram terner *Wollastonite-Enstatite-*

Ferrosillite, mineral *augite* adalah kelompok *pyroxene* dengan komposisi terbanyak adalah unsur Ca dan Mg (Gambar 4.2). Komposisi kimia *augite* dalam satuan persen mol yaitu 40% *Wollastonite*, 32% *Enstatite*, dan 28% *Ferrosilite* (Burns, 1993).



Gambar 4.2 Diagram Terner *Wo-En-Fs* Komposisi *Diopside* (hijau), *Augite* (merah), and *Orthopyroxene* (biru) (Webster dkk, 2003)

Olivine adalah salah satu kelompok mineral silikat dengan formula M_2SiO_4 dimana M adalah unsur logam umumnya Fe atau Mg. *Fayalite* (Fe_2SiO_4) dan *forsterite* (Mg_2SiO_4) terbentuk oleh substitusi larutan padat (*solid solution*) dimana atom-atom besi dan magnesium dapat disubstitusi satu sama lain tanpa perubahan yang signifikan dari struktur kristalnya (Mihailova dan Mehandjiev, 2010). Berdasarkan hasil karakterisasi terak feronikel menunjukkan bahwa mineral *olivine* yang terdapat dalam terak feronikel adalah mineral *forsterite* ($\text{Mg}_{1,82}\text{Fe}_{0,18}\text{SiO}_4$). Hal ini dapat dilihat pada formulanya dimana komposisi atom Mg lebih banyak dari atom Fe. Kehadiran *forsterite* ini dikonfirmasi dengan penelitian lain yang menunjukkan bahwa *forsterite* merupakan salah satu mineral hadir dalam terak feronikel (Demotica dkk, 2012; Choi dan Choi, 2015; Komnitsas dkk, 2007), sebagaimana ia hadir dalam terak nikel yang mengandung

kadar tinggi magnesium (Yang dkk, 2014). Pada diagram fase terak sistem MgO-SiO₂-Al₂O₃ (Bab 2, bagian 2.2.4.2), *forsterite* memiliki titik lebur yang sangat tinggi yaitu 1900 °C sehingga termasuk dalam mineral yang secara alamiah sukar diperoleh dalam keadaan murni. Pembentukan *forsterite* dimulai dengan reaksi keadaan padat antara prekursor. Tahap pertama adalah pembentukan *enstatite* dari reaksi antara MgO dengan SiO₂ (Persamaan 4.1) dan dilanjutkan dengan pembentukan *forsterite* (Persamaan 4.2) akibat perlakuan panas sebagai transformasi lanjutan (Meng dkk., 2015).



4.1.2 Hasil Pengujian EDX Terak Feronikel

Analisis selanjutnya adalah menentukan komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam material terak feronikel melalui pengujian EDX. Berdasarkan hasil analisis EDX diketahui bahwa unsur-unsur yang terkandung dalam terak feronikel dapat dilihat pada Tabel 4.2. Data tersebut merupakan rata-rata dari beberapa pengujian EDX.

Tabel 4.2 Komposisi Kimia Terak Feronikel

No	Unsur	Konsentrasi (% berat)
1	O	37,48
2	Mg	12,23
3	Al	5,25
4	Si	21,87
5	Ca	16,06
6	Fe	7,11

Unsur-unsur yang diketahui pada Tabel 4.2 kemudian dikonversi ke dalam bentuk oksida yang ditentukan berdasarkan perbandingan massa molekul relatif (Mr oksida) terhadap massa atom relatif (Ar unsur). Komposisi mineral oksida yang terdapat pada terak feronikel dapat dilihat pada Tabel 4.3. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa kandungan SiO₂ dalam terak feronikel jauh lebih besar dari Al₂O₃, dimana kedua oksida ini merupakan komponen utama dalam sintesis

material geopolimer. Silikat merupakan komponen yang penting dalam terak dimana SiO_2 sebagai sumber silikat memberikan karakteristik asam dari terak itu sendiri. Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa rasio Si/Al tergolong besar sementara pada penelitian ini rasio Si/Al berkisar antara 1,5-3,5. Dengan demikian, terak feronikel harus ditambah dengan material lain yang memiliki kandungan Al yang tinggi.

Tabel 4.3 Komposisi Oksida Terak Feronikel

No	Komponen	Komposisi (% berat)
1	SiO_2	43,08
2	Al_2O_3	9,13
3	FeO	8,43
4	MgO	18,67
5	CaO	20,69

Pada penelitian ini, terak dicampur kering secara homogen dengan serbuk aluminium hidroksida, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Tujuan penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ pada terak feronikel adalah untuk memenuhi kebutuhan komposisi kimia Al sehingga mencapai komposisi kimia yang diinginkan. Pemilihan $\text{Al}(\text{OH})_3$ sebaga campuran terak feronikel karena beberapa alasan, diantaranya $\text{Al}(\text{OH})_3$ memiliki kandungan Al yang sangat besar (% berat), ketersediaan bahan bakunya masih memungkinkan diperoleh, dan lebih murah jika dibandingkan dengan menggunakan oksidanya (Al_2O_3) secara langsung meskipun kandungannya lebih tinggi.

Penentuan kebutuhan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang ditambahkan ke dalam terak feronikel dilakukan perhitungan sebagaimana tertera pada Lampiran 2. Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh data pada Tabel 4.4. Penentuan kebutuhan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang ditambahkan ke dalam *slag* dilakukan berdasarkan perbandingan antara massa molekul relatif $\text{Al}(\text{OH})_3$ dengan massa atom relatif Al kemudian dikalikan dengan massa Al yang terkandung dalam $\text{Al}(\text{OH})_3$, sehingga diperoleh massa $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang harus ditambahkan sebagai fungsi dari rasio Si/Al.

Tabel 4.4 Kebutuhan Al(OH)_3 yang Ditambahkan

Rasio Si/Al	Massa Slag	% SiO_2 dalam Terak	% Al_2O_3 dalam Terak	Massa Si	Massa Al dalam		Massa Al(OH)_3
					Slag	Al(OH)_3	
1,50	850,00	43,08	9,13	171,18	41,07	73,05	211,13
2,00	850,00	43,08	9,13	171,18	41,07	44,52	128,67
2,50	850,00	43,08	9,13	171,18	41,07	27,40	79,19
3,00	850,00	43,08	9,13	171,18	41,07	15,99	46,21
3,50	850,00	43,08	9,13	171,18	41,07	7,84	22,65

Ket: massa dalam satuan gram

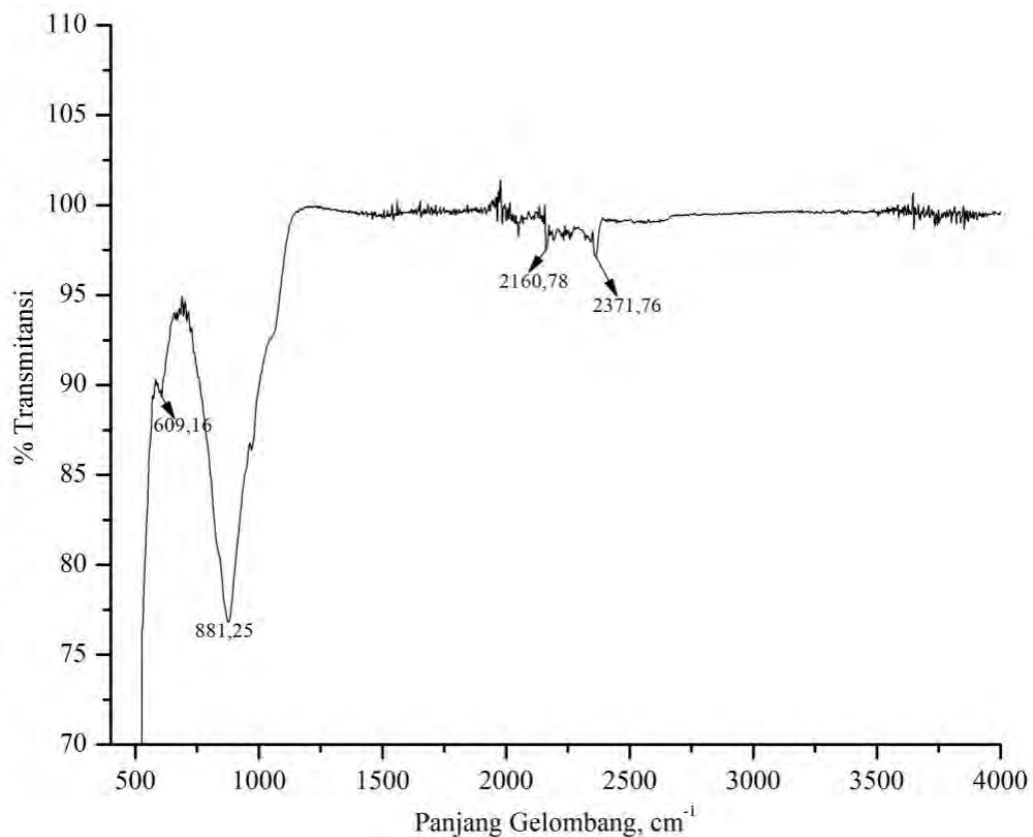
Sumber: Hasil perhitungan

4.1.3 Hasil Pengujian FTIR Terak Feronikel

Pengujian FTIR terak feronikel yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.3. Hasil FTIR terak feronikel menampilkan puncak-puncak pita serapan pada panjang gelombang $609,16\text{ cm}^{-1}$, $881,25\text{ cm}^{-1}$, $2160,78\text{ cm}^{-1}$ dan $2371,76\text{ cm}^{-1}$. Pada pita serapan yang lebih besar dari 1600 cm^{-1} menampilkan getaran molekul air berupa renggangan ($-\text{OH}$) dan tekukan (H-O-H). Sedangkan puncak yang berada pada $450\text{--}780\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran tekukan Si-O-Si dan O-Si-O . Penelitian yang dilakukan Fathi dkk (2009) tentang sintesis *forsterite* nanostruktur menunjukkan adanya puncak dari pita Si-O dalam tetrahedron SiO_4 yang membuktikan pembentukan *forsterite*. Pita-pita yang terkait dengan puncak karakteristik dari *forsterite* muncul pada kisaran $830\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ (SiO_4 peregangan) dan $500\text{--}620\text{ cm}^{-1}$ (SiO_4 lentur). Sedangkan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Naghiu dkk (2013) dijelaskan bahwa SiO_4 lentur terdapat pada kisaran pita di 513 dan 620 cm^{-1} dan SiO_4 peregangan pada 890 dan 1010 cm^{-1} .

Pada rentang panjang gelombang antara $890\text{--}1010\text{ cm}^{-1}$ dikonfirmasi bahwa struktur SiO_4 peregangan mencakup ikatan Si-O peregangan simetri yang menjembatani (*bridging*) atom oksigen dalam struktur tetrahedron dan ikatan Si-O peregangan simetri *non-bridging* dari atom oksigen (Kamalian dkk., 2012). Selain itu, hasil yang mirip juga diperoleh dari penelitian Mihailova dan Mehandjiev (2010) yang menunjukkan adanya tiga rentang pita serapan spektrum infrared. Pertama, pita spektrum antara $850\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ adalah hasil pemisahan degenerasi peregangan asimetris Si-O dalam mode SiO_4 . Kedua, pita dengan panjang

gelombang 825 cm^{-1} merupakan hasil dari peregangan mode simetris. Ketiga, pita serapan pada panjang gelombang $460\text{-}610\text{ cm}^{-1}$ adalah pemisahan dari degenerasi vibrasi lentur asimetris. Selain itu, pita serapan pada rentang $600\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ merupakan pita-pita baru yang disebabkan oleh pergantian Al untuk Si dalam kisi silikon-oksigen memodifikasi vibrasi Si-O, yang dianggap berasal dari vibrasi Si-O-Al. Dengan demikian, puncak dengan pita $609,16\text{ cm}^{-1}$ dan $881,25\text{ cm}^{-1}$ merupakan pita yang masing-masing dimiliki oleh struktur dari SiO_4 lentur dan SiO_4 peregangan.



Gambar 4.3 Spektrum FTIR Terak Feronikel

4.1.4 Hasil Pengujian Penyerapan Air Semen Geopolimer

Hasil pengujian *water absorption* (penyerapan air) dari semen geopolimer dapat dilihat pada Lampiran 4 dan Tabel 4.5. Berdasarkan Tabel 4.5, penyerapan air yang diperoleh masih cukup tinggi dengan meningkatnya waktu perendaman dan rasio Si/Al. Walaupun pada waktu perendaman selama 4 dan 24 jam

penyerapan airnya mengalami penurunan dengan peningkatan rasio Si/Al. Nilai penyerapan air terendah dan tertinggi masing-masing dimiliki oleh semen geopolimer dengan rasio Si/Al = 2,0 dan 2,5. Penyerapan air mengalami peningkatan dengan meningkatnya waktu perendaman.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Penyerapan Air (dalam gram/100 cm²)

Kode	Massa Awal	Massa Sampel pada Waktu T Setelah Perendaman				Absorpsi (gram/100 cm ²)				Luasan
		W _{0,25}	W ₁	W ₄	W ₂₄	AT _{0,25}	AT ₁	AT ₄	AT ₂₄	
A	261,5	268,7	276,2	283,3	284,6	27,6	56,7	83,8	88,6	2601,0
B	267,0	273,8	279,9	286,7	288,5	26,3	49,8	76,4	83,4	2582,1
C	273,5	282,5	291,4	296,5	297,3	34,9	69,6	89,6	92,7	2567,1
D	278,0	288,8	601,3	301,3	302,1	40,4	79,7	87,5	90,8	2655,6
E	281,6	292,1	300,5	302,0	302,8	40,6	72,7	78,8	81,7	2595,9

Sumber: Hasil pengujian dan perhitungan

4.1.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Semen Geopolimer

Hasil pengujian kuat tekan semen geopolimer setelah 28 hari waktu *curing* pada suhu ruang dapat dilihat pada Tabel 4.6. Berdasarkan Tabel 4.6 dapat diketahui bahwa nilai kuat tekan semen geopolimer yang dihasilkan bervariasi dengan meningkatnya rasio Si/Al. Nilai kuat tekan tertinggi yang dimiliki semen geopolimer ketika rasio Si/Al = 3,5 (geopolimer E). Hasil kuat tekan yang dihasilkan memiliki kecenderungan terjadi peningkatan dengan meningkatnya rasio Si/Al.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Setelah 28 Hari

Sampel	Kuat Tekan (MPa)			Rata-rata
	4	5	6	
A	9,96	10,61	9,77	10,11
B	8,77	7,18	8,10	8,02
C	10,04	11,37	10,26	10,55
D	9,28	10,15	9,75	9,73
E	11,56	11,24	14,85	12,55

Sumber: Hasil pengujian dan perhitungan

Berdasarkan perhitungan pada Lampiran 5 dan Tabel 4.7, standar deviasi terendah dan tertinggi masing diperoleh pada sampel dengan rasio Si/Al = 1,5 dan 3,5. Hasil ini menunjukkan bahwa pada sampel dengan rasio Si/Al = 1,5, distribusi nilai kuat tekan untuk tiga kali pengujian memiliki selisih yang sangat kecil dibandingkan pada sampel dengan rasio Si/Al = 3,5. Standar deviasi mengungkapkan bahwa semakin kecil nilai standar deviasinya menunjukkan hasil pengujian yang baik.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Standar Deviasi Kuat Tekan

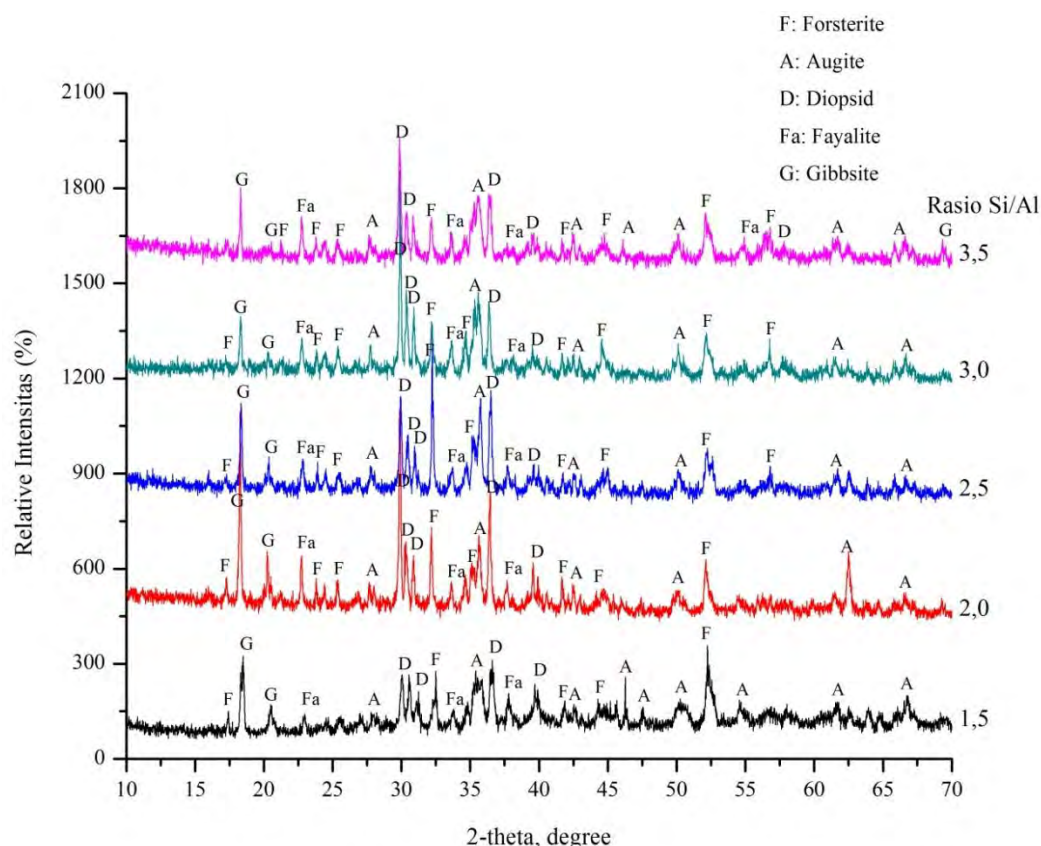
Sampel	Pengujian			Rata-rata	SD
	I	II	III		
A	9,95615	10,6124	9,77492	10,1145	0,44062
B	8,77495	7,175	8,09996	8,01663	0,80322
C	10,0374	11,3687	10,2562	10,5541	0,71386
D	9,2812	10,1499	9,74878	9,72664	0,4348
E	11,5562	11,2375	14,8499	12,5479	2,00001

Sumber: Hasil perhitungan

4.2 Pembahasan

4.2.1 Analisis *X-Ray Diffraction*

Analisis *X-Ray Diffraction* digunakan untuk mengetahui fase senyawa yang terdapat dalam material geopolimer yang terbentuk. Transformasi mineralogikal yang terjadi selama proses geopolimerisasi dari terak feronikel dan mineral-mineral yang terkandung dalam semen geopolimer masing-masing dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Tabel 4.8. Berdasarkan hasil XRD pada Gambar 4.4 dapat dijelaskan beberapa karakteristik puncak yang dihasilkan. Secara umum, puncak-puncak yang dihasilkan semakin berkurang ketajamannya dengan semakin meningkatnya rasio Si/Al, terutama pada $2\theta = 17,25^\circ$, $20,42^\circ$ dan $52,11^\circ$. Hal ini mengindikasikan bahwa proses geopolimerisasi menghasilkan struktur fase amorf dari aluminosilikat.



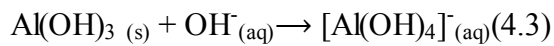
Gambar 4.4 Pola XRD Semen Geopolimer dengan Perbedaan Rasio Si/Al

Tabel 4.8 Komposisi Mineral dalam Produk Geopolimer

No	Kelompok	Nama Mineral	Formula	Kode Referensi
1	<i>Pyroxene</i>	<i>Augite</i>	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$	01-088-0849
		<i>Diopside</i>	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	01-083-1821
2	<i>Olivine</i>	<i>Forsterite</i>	Mg_2SiO_4	00-001-1290
		<i>Fayalite</i>	Fe_2SiO_4	01-071-1668
3		<i>Gibbsite</i>	$\text{Al}(\text{OH})_3$	01-074-1775

Puncak baru yang terbentuk untuk semua produk geopolimer pada $2\theta = 18,34^\circ$ dan $20,42^\circ$ merupakan karakteristik dari *gibbsite* sebagai hasil dari penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Hal ini dikonfirmasi oleh penelitian sebelumnya (Mijarsh dkk, 2015), dimana dalam larutan alkalin, $\text{Al}(\text{OH})_3$ mengalami pembubaran membentuk spesies aluminat menurut reaksi pada Persamaan 4.3. Kehadiran *gibbsite* pada $2\theta = 20,42^\circ$ memiliki puncak semakin menurun dengan meningkatnya rasio Si/Al. Karakteristik ini dapat dikaitkan dengan pembentukan struktur geopolimer yang lebih kompleks karena peningkatan konsentrasi Si

sehingga semakin banyak spesis aluminat yang digunakan untuk pembubaran silikat. Karakteristik puncak pada $2\theta < 20^\circ$ merupakan fenomena polikondensasi yang berlangsung selama geopolimerisasi fase cair aluminosilikat karena pembubaran sebagian fase amorf dalam terak feronikel.

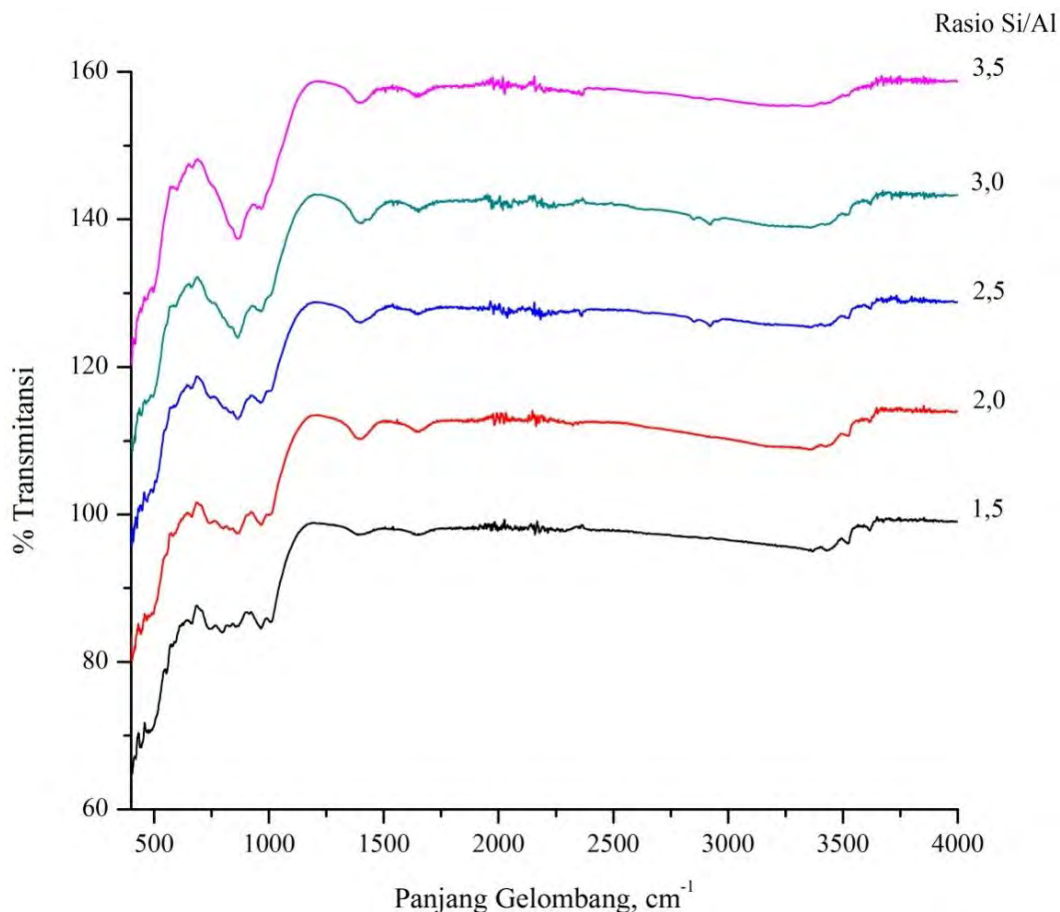


4.2.2 Analisis FTIR Semen Geopolimer

Pembentukan geopolimer merupakan hasil dari reaksi geopolimerisasi yang melibatkan restrukturisasi (pembentukan struktur) material. Spektroskopi FTIR salah satunya digunakan untuk menganalisis pembentukan geopolimer ini. Analisis ini berkaitan dengan ikatan Si-O-X (X = Si, Al) dalam struktur geopolimer yang terbentuk. Hasil pengujian spektroskopi *infrared* (FTIR) dapat dilihat pada Gambar 4.5, menunjukkan pita serapan pada panjang gelombang antara 400-4000 cm^{-1} . Secara umum Gambar 4.5 dapat dijelaskan bahwa terdapat puncak-puncak baru produk geopolimer berdasarkan rasio Si/Al sebagai hasil dari penambahan Al(OH)_3 . Puncak-puncak baru yang lebih menonjol terjadi pada panjang gelombang antara 400-500 cm^{-1} , 700-1100 cm^{-1} , 1300-1750 cm^{-1} , dan 3300-3700 cm^{-1} .

Secara garis besar, spektra FTIR terbagi dalam dua rentang, yaitu 370-1300 cm^{-1} berkaitan dengan mode vibrasi unit Si-O-Si dan 1600-4000 cm^{-1} berhubungan dengan mode vibrasi air yang terserap (Dimas dkk, 2009). Hal ini menunjukkan fakta bahwa pada rentang antara 1600-4000 cm^{-1} produk geopolimer mengandung air bebas yang diserap dari lingkungan serta molekul air yang terikat dalam struktur jaringan geopolimer (Panias dkk, 2007; Ogundiran dan Kumar, 2015) dari proses kristalisasi dan penyerapan produk reaksi (Puertas dan Fernandez-Jimenez, 2003). Puncak yang semakin terlihat dari produk geopolimer dibandingkan terak feronikel pada panjang gelombang 1652,46 cm^{-1} menunjukkan derajat yang lebih tinggi dari molekul air terikat dalam struktur geopolimer yang dihasilkan. Puncak antara 1300-1600 cm^{-1} berkaitan dengan pita serapan yang dimiliki oleh unit karbonat (Zhang dkk, 2012; Nath dan Kumar, 2013; Onisei dkk, 2015; Nath dkk, 2016). Puncak pada panjang gelombang 1395 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi peregangan dari ikatan O-C-O yang mengindikasikan adanya

natrium bikarbonat atau *calcite* (Onisei dkk, 2015) sebagai akibat rekasi karbonasi atmosfer dari fase cair dengan kandungan alkali tinggi, yang tersebar di permukaan material geopolimer (Panias dkk, 2007).



Gambar 4.5 Spektra FTIR Geopolimer dengan Perbedaan Rasio Si/Al pada Rentang Panjang Gelombang 400-4000 cm^{-1}

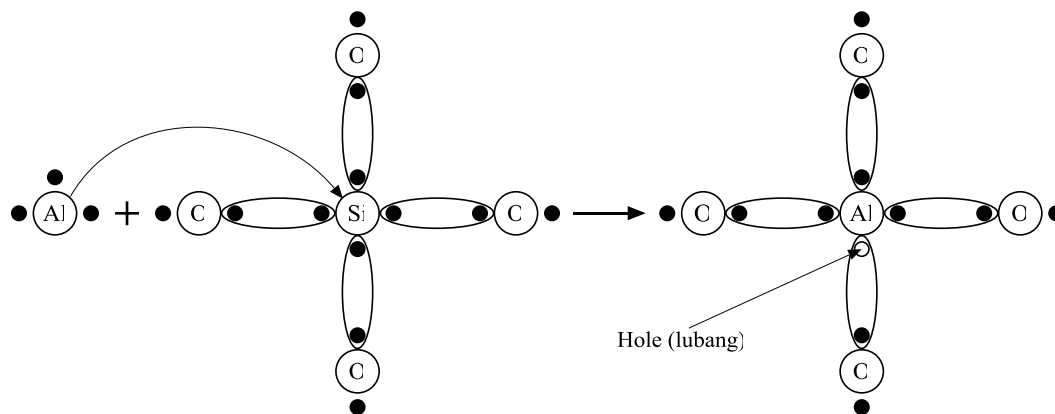
Puncak-puncak dalam rentang 400-1200 cm^{-1} masih tergolong ke dalam struktur Si-O-X ($X = \text{Si}, \text{Al}$) dalam sistem geopolimer. Perbedaan mencolok dari puncak yang dihasilkan, yakni pada rentang sekitar 768-1200 cm^{-1} . Pada rentang panjang gelombang inilah terjadi proses geopolimerisasi (Dimas dkk, 2009). Semakin kecil rasio Si/Al (penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$) menyebabkan pembentukan puncak baru dalam struktur geopolimer. Puncak baru mulai terlihat pada rasio Si/Al = 3 yakni pada panjang gelombang sekitar 1009,63 cm^{-1} hingga semakin tajam dengan semakin kecil rasio Si/Al. Hal ini berkaitan dengan vibrasi

peregangan asimetris unit Si-O struktur tetrahedral SiO_4 dalam aluminosilikat. Vibrasi peregangan asimetris dan pergeseran pita mengungkapkan pembubaran bahan padat awal ke dalam larutan basa kuat dan pembentukan produk baru selama geopolimerisasi. Produk baru yang dihasilkan dari peristiwa ini adalah fase amorf aluminosilikat (Maragkos dkk, 2009; Onisei dkk, 2012) dan jaringan tiga dimensi (Gambar 4.8) yang terdiri dari spesies polimer dengan rantai polisialat lebih besar (Puertas dan Fernandez-Jimenez, 2003). Hal ini dikonfirmasi dengan semakin berkurangnya puncak-puncak tajam dalam pola XRD (Gambar 4.4). Pita serapan pada $664,34 \text{ cm}^{-1}$ berkaitan dengan penggabungan aluminium tetrahedral dalam aluminosilikat yang disebabkan oleh pembentukan fase baru zeolit amorf (Maragkos dkk, 2009).

Pada proses sintesis geopolimer berbasis terak feronikel, puncak struktur Si-O-Si mengalami perpindahan ke panjang gelombang yang lebih tinggi sebagai akibat dari perubahan struktur Si-O-Si simetris ke model asimetris yang diikuti oleh penggantian (substitusi) beberapa atom Si oleh Al melalui proses depolimerisasi silikat karena penambahan Al(OH)_3 . Penggantian Si dalam struktur Si-O-Si menjadi Al-O-Si semakin banyak dengan semakin tingginya kandungan Al dalam sistem geopolimer. Dengan kata lain, partikel silikat terlarut dengan cepat sehingga memiliki kesempatan yang lebih besar untuk berinteraksi dengan larutan aluminat membentuk jaringan gel dengan kandungan Al yang tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pembentukan gel geopolimer awal terjadi pada rasio Si/Al yang lebih rendah daripada ketika nukleasi terjadi dalam kondisi kaya silika. Kehadiran alumina terlarut yang signifikan karena kompleksasi (pembentukan kompleks) dari silikat yang dibubarkan (*dissolution*) oleh spesies aluminat (mulai tahapan oligomerisasi, nukleasi, dan selanjutnya pertumbuhan gel) mengarah ke gradien konsentrasi silikat yang tinggi (Hajimohammadi dkk, 2011). Peningkatan rasio Si/Al juga meningkat dalam struktur gel geopolimer sebagai akibat penggabungan lebih lanjut monomer silikat dengan menangkap tiap monomer aluminat yang dilepas dalam larutan.

Dalam struktur tetrahedral SiO_4 , ketika Si digantikan dengan Al (memiliki tiga elektron valensi) maka hanya tiga ikatan kovalen yang dapat dipenuhi. Sedangkan tempat yang seharusnya membentuk ikatan kovalen keempat menjadi

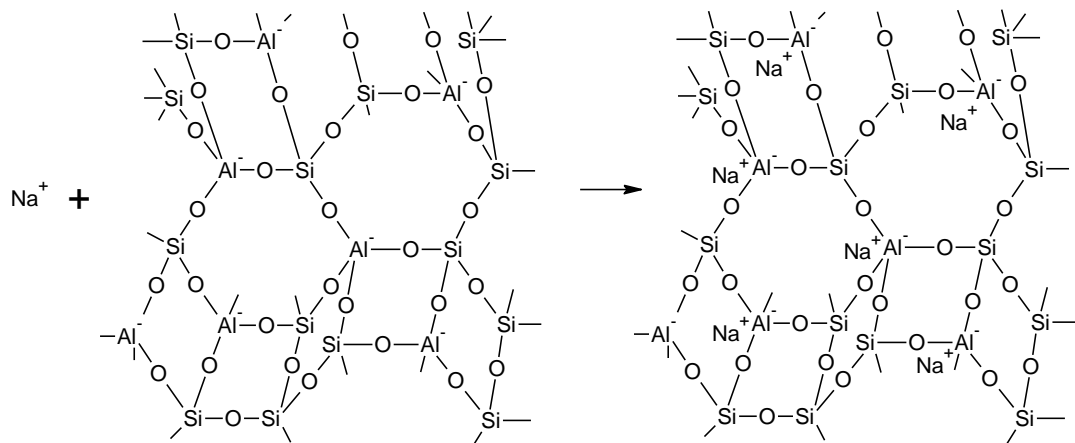
kosong (membentuk lubang) dan bisa ditempati oleh elektron valensi lain (Gambar 4.6).



Gambar 4.6 Substitusi Atom Si oleh Al

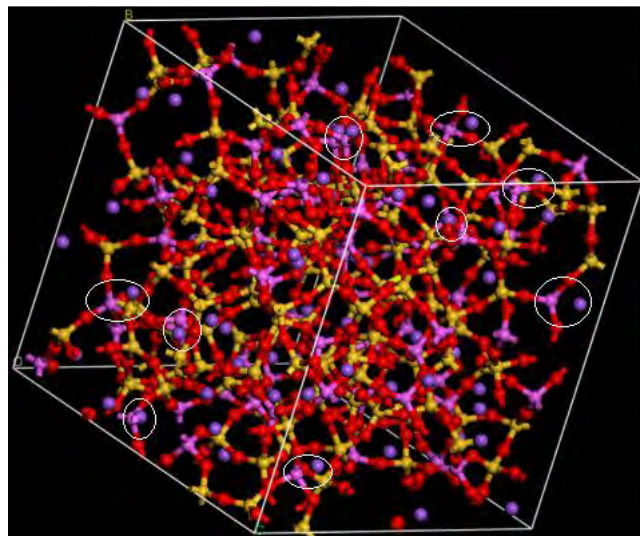
Berdasarkan Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa sebuah atom bervalensi tiga menyumbangkan sebuah *hole* (lubang). Artinya, semakin kecil rasio Si/Al berarti semakin banyak atom Al menggantikan Si dalam struktur tersebut. Konsekuensinya adalah semakin banyak lubang yang terbentuk, sehingga semakin banyak elektron bebas yang tidak berikatan. Adanya elektron bebas inilah menyebabkan struktur tersebut tidak stabil. Ketidakstabilan inilah yang menyebabkan produk geopolimer yang dihasilkan memiliki kuat tekan yang rendah (Gambar 4.10). Dalam kondisi ini atom Al bertindak sebagai atom akseptor, karena atom ini siap untuk menerima elektron.

Perubahan rasio Si/Al dalam struktur geopolimer mengubah muatan sehingga pada akhirnya mengubah jumlah kation penyeimbang. Salah satu tujuan larutan NaOH sebagai larutan aktivator alkali adalah untuk menstabilkan struktur geopolimer yang bertindak sebagai kation penyeimbang. Hal ini karena NaOH dapat menyumbangkan satu elektron dari Na sehingga membentuk ion Na^+ yang selanjutnya elektron tersebut diterima oleh Al. Sementara ion OH^- berperan dalam proses pembubaran sumber aluminosilikat. Kerangka Si-O-Al dalam sistem geopolimer bersifat rigid (Gambar 4.7), tetapi kation (Na^+) bukan merupakan bagian dari kerangka tersebut. Kation yang berada dalam rongga geopolimer bersifat mobil dan dapat digantikan oleh kation lainnya.



Gambar 4.7 Proses Transfer Ion Na^+ sebagai Kation dalam Struktur Si-O-Al

Fungsi atom Na dalam struktur geopolimer sebagai kation penyeimbang digambarkan dalam model tiga dimensi sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.8, dimana terlihat jelas bahwa atom-atom Na menempati posisi yang dekat dengan atom Al dalam struktur geopolimer.



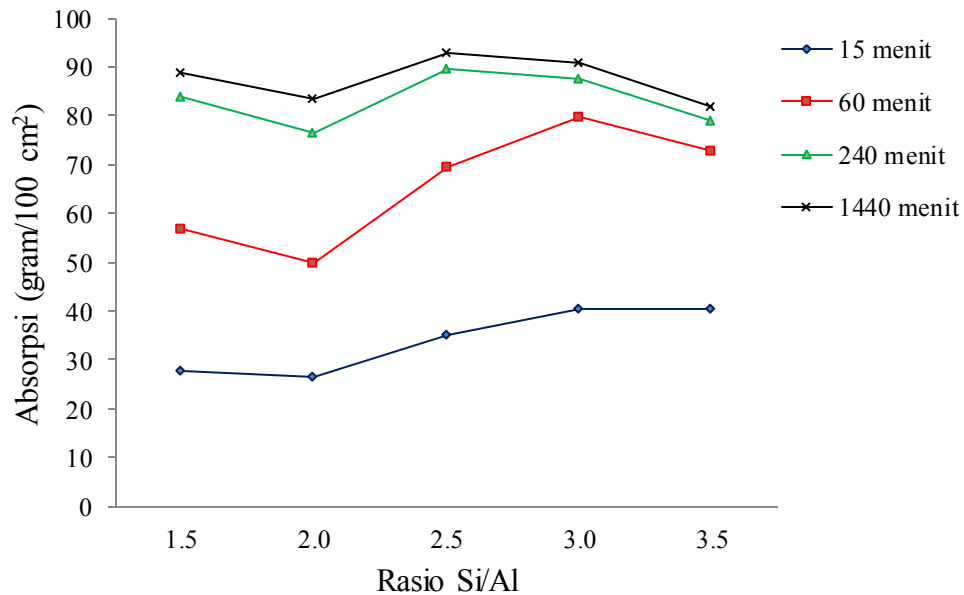
Gambar 4.8 Struktur Tiga Dimensi Geopolimer dengan Atom Na (biru) sebagai Kation Penyeimbang Atom Al (ungu); O (merah) dan Si (kuning) untuk Rasio $\text{Si}/\text{Al} = 2$ (Sadat dkk, 2016)

Karakteristik lain adalah terjadinya perubahan puncak yang semakin lebar pada panjang gelombang sekitar $865,01 \text{ cm}^{-1}$, puncak yang semakin tajam pada $965,36 \text{ cm}^{-1}$ dan munculnya puncak baru pada panjang gelombang sekitar $794,19$

cm^{-1} dengan penurunan rasio Si/Al. Pita serapan pada panjang gelombang 965,36 cm^{-1} merupakan hasil pergeseran karena vibrasi peregangan X-O-Si (X = Si atau Al) sebagai akibat dari reorganisasi XO_4 yang berlangsung ketika geopolimer dibangun dari terak yakni pada rentang panjang gelombang 900-1200 cm^{-1} (Komnitsas dkk, 2007). Karakteristik pita serapan pada panjang gelombang ini juga membuktikan bahwa terjadi pembubaran (*dissolution*) dari sumber aluminosilikat (Gharzouni dkk, 2016) membentuk fase baru aluminosilikat (Giannopoulou dkk, 2009). Pita serapan pada panjang gelombang 794,19 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi peregangan simetri dari struktur Si-O-X (X = Si, Al) yang disebabkan karena hadirnya gel aluminosilikat dan fase glass dalam spesimen (Lee dan Lee, 2015). Pita serapan pada panjang gelombang sekitar 445,11 cm^{-1} dan 460 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi tekuk (*bending*) dari struktur Si-O-Si atau O-Si-O (Kusumastuti, 2012) dan Si-O atau Al-O (Zhang dkk, 2012) sebagai akibat dari sebagian SiO_2 yang larut dalam larutan alkali kuat (Onisei dkk, 2015). Hasil tersebut membuktikan adanya transformasi fase yang terjadi selama geopolimerisasi terak feronikel menghasilkan pembentukan fase baru aluminosilikat amorf terpolimerisasi yang lebih baik, serta fase baru zeolit amorf (Maragkos dkk, 2009). Pita serapan pada panjang gelombang ini lebih lebar terutama pada rasio Si/Al rendah yang mengindikasikan pH tinggi sebagai akibat penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$.

4.2.3 Penyerapan Air Semen Geopolimer

Tujuan dari pengujian penyerapan air adalah untuk mengetahui seberapa mudah aliran air yang masuk ke dalam material geopolimer. Penyerapan air merupakan parameter yang sangat penting dalam pembuatan geopolimer karena menunjukkan permeabilitas dan tingkat reaksi dari geopolimer. Semakin kecil penyerapan air akan semakin kecil permeabilitasnya. Secara umum, tingkat geopolimerisasi yang tinggi menyebabkan matriks geopolimer memiliki pori dan permeabilitas yang rendah (Ken dkk, 2015).



Gambar 4.9 Distribusi Penyerapan Air Semen Geopolimer

Berdasarkan Gambar 4.9 diketahui bahwa penyerapan air cenderung meningkat dengan peningkatan waktu perendaman dan rasio Si/Al. Namun, terdapat penyimpangan pada rasio Si/Al = 2,0 yang memiliki nilai penyerapan air terendah. Selain itu, terjadi penurunan penyerapan air pada waktu 240 dan 1440 menit dengan meningkatnya rasio Si/Al dari 2,5 ke 3,5. Terjadi peningkatan yang sangat kecil pada waktu 240 hingga 1440 menit yang menunjukkan penyerapan air sudah terjadi secara maksimal.

Pada penelitian ini spesimen dipanaskan dalam oven selama 24 jam pada ± 112 °C. Tujuan pemanasan ini adalah untuk memperoleh massa spesimen konstan. Artinya, spesimen uji benar-benar kering dengan tujuan agar pengujian air terjadi secara efisien. Nilai-nilai penyerapan air yang diperoleh masih tergolong sangat tinggi. Salah satu faktor yang mempengaruhinya adalah tingkat kekeringan dari spesimen. Spesimen yang dikeringkan pada suhu ruang memiliki penyerapan air yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen yang dikeringkan pada oven hingga massanya konstan. Hal ini sebagaimana hasil penelitian yang dilakukan oleh Yang dkk (2014) bahwa spesimen yang dikeringkan pada kondisi kelembaban jenuh setelah 28 hari pada 20 °C memiliki

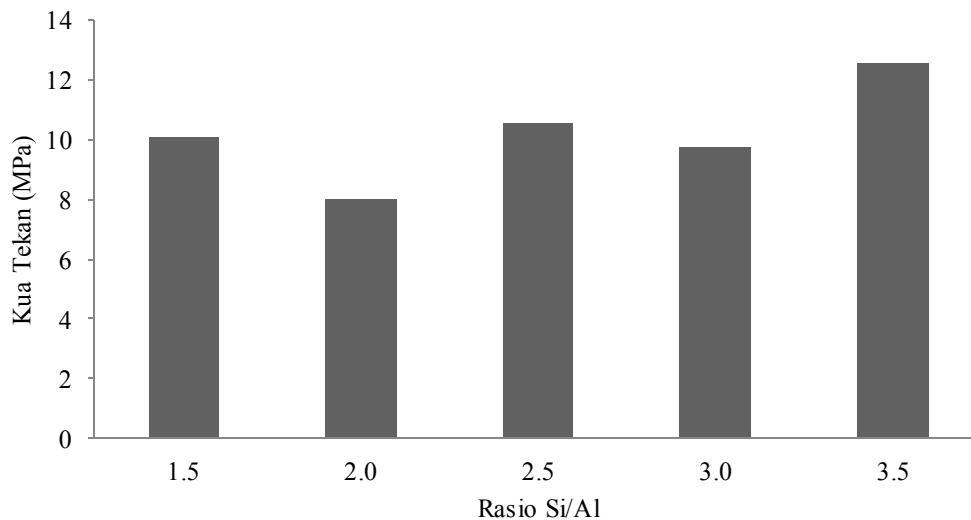
penyerapan air yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen yang dikeringkan pada 105 °C.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Ahmari dkk (2012) menjelaskan pengaruh faktor penekanan dalam pembuatan geopolimer terhadap penyerapan air geopolimer. Peningkatan penyerapan air dengan meningkatnya tekanan menyebabkan jumlah yang lebih tinggi dari larutan NaOH yang terperas keluar. Dalam kondisi seperti itu, reaksi geopolimerisasi terhalang sehingga gel geopolimer yang terbentuk sedikit dan kemudian menghasilkan porositas tinggi dari matriks geopolimer. Dengan kata lain, proses geopolimerisasi yang lebih tinggi terhambat sehingga struktur geopolimer yang dihasilkan kurang homogen (Gambar 4.13a) sebagai akibat adanya terak yang tidak terlibat dalam reaksi. Selain itu, faktor lain yang juga memiliki pengaruh adalah kandungan aktivator alkali yang digunakan dalam produksi geopolimer dimana penyerapan air akan semakin rendah dengan kandungan tinggi aktivator alkali.

Pada aplikasinya, faktor penyerapan air material geopolimer merupakan aspek penting dalam konstruksi dan kekuatan serta lamanya pemakaian, terutama pada konstruksi-konstruksi yang dibangun didekat daerah yang cenderung kontak langsung dengan bahan cair seperti konstruksi pada jembatan. Semakin kecil penyerapan air geopolimer, maka akan semakin sedikit air yang dapat masuk ke dalam konstruksinya. Itu artinya material geopolimer lebih awet dan umur pemakaiannya juga lebih panjang.

4.2.4 Kuat Tekan Semen Geopolimer

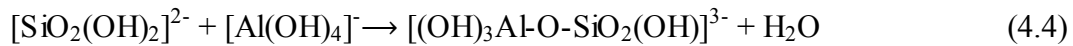
Berdasarkan Tabel 4.6, nilai kuat tekan semen geopolimer dapat disajikan dalam bentuk diagram sebagaimana terlihat pada Gambar 4.10. Secara umum, Gambar 4.10 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kuat tekan dengan meningkatnya rasio Si/Al walau terjadi penyimpangan pada rasio Si/Al = 2,0 dan 3,0. Walau demikian, geopolimer dengan rasio Si/Al = 2,0 dan 3,0 pun memiliki kecenderungan mengalami peningkatan kuat tekan dengan meningkatnya rasio Si/Al. Namun, rasio Si/Al yang semakin tinggi dapat menurunkan kekuatan (Duxson dkk, 2007a).



Gambar 4.10 Nilai Kuat Tekan Semen Geopolimer versus Rasio Si/Al

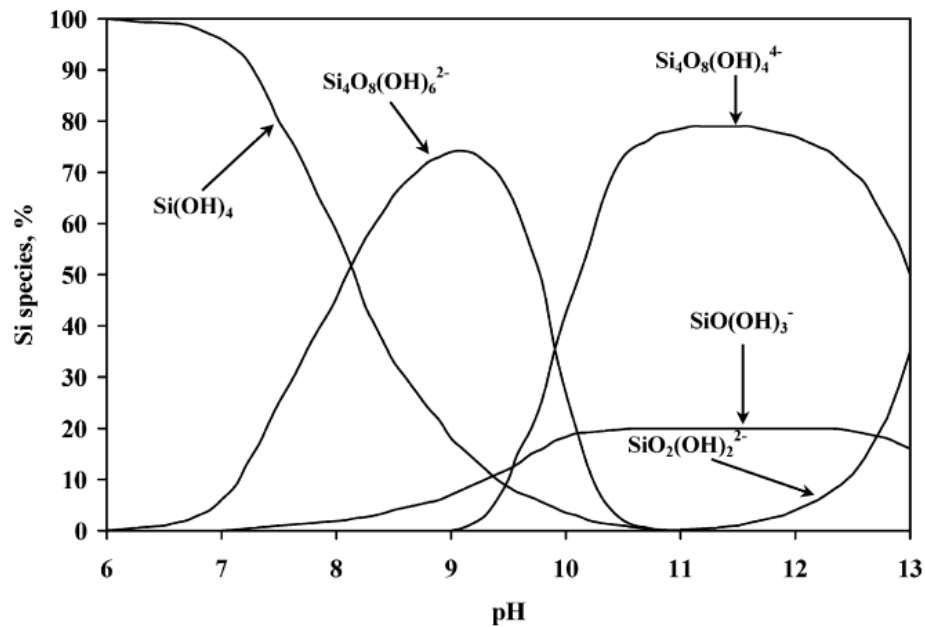
Secara teoritis, ikatan antara Si-O-Si lebih kuat dibandingkan dengan ikatan Si-O-Al dan Al-O-Al yang berarti bahwa kekuatan meningkat dengan meningkatnya rasio Si/Al. Penelitian yang dilakukan oleh Giannopoulou dkk (2009) mengkonfirmasi hasil ini, bahwa terjadi peningkatan nilai kuat tekan dengan meningkatnya konsentrasi Si walau peningkatan itu tidak terjadi secara linear.

Pengembangan pengerasan lebih lanjut semen geopolimer terjadi pada kondisi suhu ruang selama 28 hari. Sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa proses pengerasan terjadi karena reaksi geopolimerisasi yang meliputi reaksi kondensasi yang bergantung pada jenis aluminat dan silikat menghasilkan monomer silikat dan aluminat. Reaksi ini berlangsung pada kondisi basa. Monomer silikat dan aluminat yang dihasilkan sebagai reaksi hidrolisis atau pembubaran komponen Al^{3+} dan Si^{4+} membentuk $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ dan $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$. Proses ini salah satunya dipengaruhi oleh konsentrasi dari larutan NaOH yang digunakan sebagai aktivator. Pada konsentrasi NaOH yang tinggi (8 molar), tahap awal reaksi kondensasi dimulai dari pembentukan oligomer kecil yang stabil sebagai dimer akibat kondensasi antara $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ dan $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ menurut Persamaan 4.4. Struktur yang dihasilkan dari Persamaan 4.4 merupakan struktur dimer yang stabil dalam kerangka polisialat ($\text{Si:Al} = 1$).



Nilai kuat tekan yang rendah salah satu faktornya adalah adanya proses geopolimerisasi yang tertunda karena rasio Si/Al yang rendah. Pada kondisi ini, diketahui mudahnya terjadi pembubaran awal Al tinggi. Hal ini berguna untuk proses reaksi lebih lanjut ketika larutan silikat ditambahkan dalam sistem geopolimer (Ogundiran dan Kumar, 2015). Rendahnya konsentrasi Si (rasio Si/Al rendah) menghasilkan struktur polisialat (Mijarsh dkk, 2015) sebagai akibat dari penggantian Si oleh Al karena penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Dalam hal ini $\text{Al}(\text{OH})_3$ akan mengalami pembubaran (*dissolution*) dalam larutan alkalin dan menyumbangkan spesies aluminat (Persamaan 4.3). Artinya, pada rasio Si/Al yang rendah sebagian besar aluminium hadir dalam bentuk monomer $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$. Tingginya monomer $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ sebagai akibat penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ menyebabkan tingginya alkalinitas sehingga produk reaksi pada Persamaan 4.4 cenderung bereaksi dengan $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ mengalami kondensasi lanjut membentuk trimer aluminosilikat (Weng dan Sagoe-Crentsil, 2007). Walaupun jenis dimer dan trimer yang dihasilkan dominan, namun pada kondisi ini sulit terjadi polimerisasi yang lebih tinggi sehingga mengganggu proses pengerasan geopolimer. Semakin tinggi aluminat maka ikatan yang mudah terbentuk adalah ikatan Si-O-Al yang lebih lemah dibandingkan ikatan Si-O-Si dalam sistem geopolimer.

Rendahnya rasio Si/Al berpengaruh pada hilangnya kuat tekan dikaitkan dengan rendahnya struktur $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ untuk membentuk struktur geopolimer yang lebih besar dibandingkan dengan struktur $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ sebagai akibat dari tingginya aluminat dalam sistem. Keseimbangan dan kestabilan kedua jenis struktur silikat bergantung pada pH (Zhang dkk, 2013). Dalam diagram spesiasi Si (Gambar 4.11), struktur $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ lebih stabil dibandingkan struktur $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ pada kondisi basa yang tinggi.

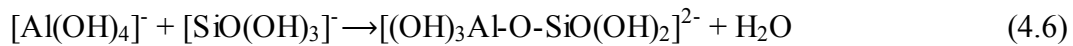


Gambar 4.11 Diagram Spesiiasi Si dalam Larutan (Panias dkk, 2007)

Penyerapan kation Na^+ dalam kondisi basa yang tinggi mengkonsumsi komponen X-OH dan X-O^- ($\text{X} = \text{Si}$ atau Al) pada permukaan partikel padat, dimana ikatan kimia antara partikel padat tak larut dengan jaringan geopolimer terjadi pada tahap akhir dari proses geopolimerisasi. Dengan demikian, material geopolimer yang dihasilkan memiliki kekuatan yang rendah (Panias dkk, 2007).

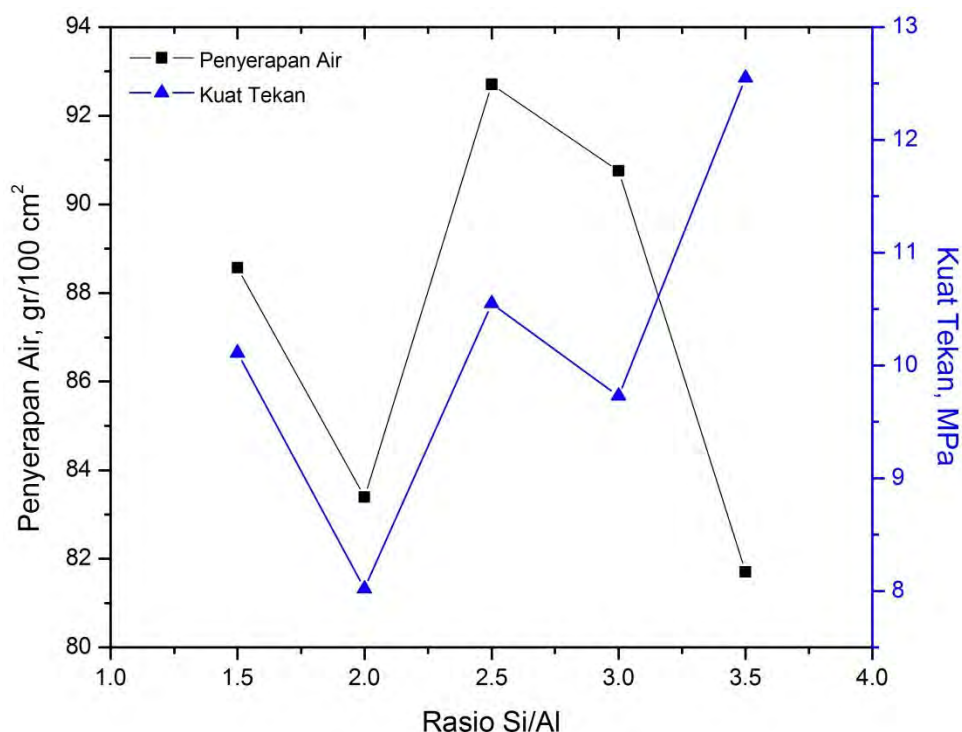
Meningkatnya rasio Si/Al berguna untuk menyediakan komponen ekstra silikat berupa monomer $[\text{SiO(OH)}_3]^-$ menurut reaksi pada Persamaan 4.5 (Weng dan Sagoe-Crentsil, 2007). Ketersediaan monomer $[\text{SiO(OH)}_3]^-$ melengkapi proses reaksi kondensasi (Persamaan 4.6) dengan $[\text{Al(OH)}_4]^-$ dan polimerisasi sendiri (*self-polymerization*) antara grup silikat yang dihasilkan dalam generasi silikat oligomer. Proses kondensasi berlanjut antara produk reaksi (Persamaan 4.6) dengan $[\text{SiO(OH)}_3]^-$ untuk membentuk produk yang lebih stabil hingga semua monomer $[\text{Al(OH)}_4]^-$ digunakan dalam reaksi. Dalam sebuah sistem dengan konsentrasi Si yang tinggi (rasio Si/Al tinggi), proses kondensasi dimulai dengan pembentukan oligomer silikat. Akhirnya pembentukan jaringan polimer tersusun (Weng dan Sagoe-Crentsil, 2007). Reaksi terus berlanjut hingga mengarah ke pembentukan struktur geopolimer poli(sialat-silokso), $-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}$ atau poli(sialat-disilokso), $-\text{Si-O-Al-O-Si-}$. Semakin tinggi konsentrasi Si

dari sumber silikat terlarut berperan dalam peningkatan jumlah ikatan Si-O-Si dan kuat tekan (Duxson dkk, 2005; Lampris dkk, 2009).



Dengan demikian, pembentukan jaringan polimer yang lebih kompleks dan peningkatan kekuatan bergantung pada jenis monomer yang dihasilkan. Yip dkk (2008) menjelaskan bahwa pembentukan gel geopolimer bergantung pada monomer $[\text{SiO}_n(\text{OH})_{4-n}]^{n-}$ dan $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ serta sejauh mana monomer-monomer tersebut mengalami pembubaran dari sumber aluminosilikat. Selain itu, Weng dan Sagoe-Crentsil (2007) menjelaskan bahwa pembentukan jaringan geopolimer bergantung pada konsentrasi $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$. Pada rasio Si/Al rendah, monomer silikat yang dihasilkan adalah $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ dan $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, dimana reaksi kondensasi yang terjadi antara keduanya cenderung membentuk oligomer kecil, seperti dimer dan trimer. Dengan meningkatnya rasio Si/Al, konsentrasi $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ juga meningkat, dimana reaksi kondensasi antara $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ dengan $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ membentuk oligomer yang lebih besar dan mengarah pada pembentukan jaringan polimer yang kompleks sehingga meningkatkan kekuatan.

Berdasarkan penjelasan tersebut, terdapat hubungan antara penyerapan air dengan kuat tekan. Artinya, semakin tinggi kuat tekan mengindikasikan bahwa mikrostruktur yang dihasilkan semakin homogen dan padat sehingga cenderung menurunkan penyerapan airnya. Hubungan antara kuat tekan dengan penyerapan air dapat dilihat pada Gambar 4.12. Gambar 4.12 memberikan informasi bahwa pada rasio Si/Al = 1,5-3,0, penyerapan air berbanding lurus dengan kuat tekan hingga pada rasio Si/Al = 3,5 penyerapan air berbanding terbalik dengan kuat tekan. Walaupun terjadi penyimpangan pada rasio Si/Al = 1,5-3,0, namun pada rasio Si/Al = 3,5 memberikan informasi bahwa kuat tekan meningkat akan menyebabkan penyerapan air yang semakin kecil sebagai akibat bahwa produk geopolimer yang dihasilkan semakin homogeny dan padat serta memiliki porositas yang rendah. Kondisi optimum berdasarkan Gambar 4.12 diperoleh ketika semen geopolimer memiliki kuat tekan dengan penyerapan air rendah, dimana kondisi ini dicapai ketika semen geopolimer memiliki rasio Si/Al = 3,5.



Gambar 4.12 Hubungan Penyerapan Air (setelah 24 jam) dengan Kuat Tekan

4.2.5 Analisis SEM Semen Geopolimer

Daya tahan struktur beberapa semen dan beton dalam aplikasinya secara erat bergantung pada sifat fisik dan transport-nya, seperti permeabilitas dan difusifitas ion yang dikontrol oleh karakteristik mikrostruktur dari pengerasan binder untuk batasan tertentu. Porositas dan distribusi ukuran pori merupakan komponen yang sangat vital dari mikrostruktur material. Hal ini menentukan permeabilitas binder gel dan tingkat penetrasi oleh *agent* yang agresif (Hajimohammadi dkk, 2011). Sifat permeabilitas ini berkaitan dengan sifat fisik lainnya, seperti penyerapan air yang merupakan salah satu aspek yang menjadi pertimbangan dalam aplikasinya, terutama pada kondisi-kondisi yang rentan terhadap air. Duxson dkk (2005) menjelaskan bahwa adanya perubahan struktur mikro dan porositas dikaitkan dengan labilitas spesis silikat yang mengontrol laju reorganisasi struktural selama geopolimerisasi, dimana struktur $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ lebih labil dari $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$. Labilitas tinggi mempromosikan terjadinya porositas interkoneksi besar sebagai akibat rendahnya konsentrasi Si (rasio Si/Al rendah).

kekentalan pasta. Sedangkan partikel-partikel yang tidak terlarut menyebabkan ikatan antarmuka dengan pengikat merupakan daerah yang sensitif yang mengungkapkan kegagalan selama pengujian kuat tekan (Maragos dkk, 2009). Akibatnya, kuat tekan dan penyerapan air yang dihasilkan pun tidak secara linear.

Di sisi lain, proses penekanan yang lebih tinggi mengakibatkan banyak larutan aktivator yang terperas keluar sehingga mempengaruhi proses pembubaran sumber aluminosilikat. Ketika larutan aktivator semakin banyak terperas sementara rasio Si/Al semakin rendah maka ikatan Si-O-Al atau Al-O-Al yang terbentuk semakin banyak dibandingkan ikatan Si-O-Si. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa ikatan Si-O-Si lebih kuat dibandingkan ikatan Si-O-Al atau Al-O-Al. Dengan demikian, semakin tinggi rasio Si/Al menyebabkan pembentukan struktur Si-O-Si dan spesis silikat yang lebih stabil. Kestabilan ini dibentuk oleh proses geopolimerisasi lanjut yang mengarah pada pembentukan jaringan geopolimer yang lebih kompleks dan homogen sehingga meningkatkan kekuatan.

Lampiran 1

Perbandingan Jenis Parameter terhadap Sifat Mekanik Material Geopolimer

Referensi	Material	Material Aktivator	Jenis Aktivator	Kondisi Optimum	Kuat Tekan
Abdel-Gawwad, 2014	GBFS	NaOH CaCO ₃	Aktivator serbuk	NaOH 5% CaCO ₃ 4% GBFS 91% Rasio W/C: 0.27 T _{curing} = 80 °C Time = 8 jam	700 kg/cm ²
Deb, 2014	FA + GGBFS	NaOH 97-98% Na-silikat (SiO ₂ = 30.0%, Na ₂ O = 11.5% and water = 58.5%)	Aktivator larutan	GGBFS 20% FA 80% Larutan aktivator 40% (SS/SH = 1.5) T _{curing} = 20 °C Time = 0-180 day	51 MPa
Sakkas, 2014	FNS	KOH 8.09% Al ₂ O ₃ 25.03% H ₂ O 24.64%	Aktivator larutan	FNS 42.24% KOH 5.85M T _{curing} = 70 °C Time = 48 jam	8.7 MPa
Yang, 2014	FA + HMNS	NaOH Na-silikat	Aktivator larutan	HMNS 20% FA 80% Rasio L/S = 0.42 Rasio SH/SS = 1.2-2.0 T _{curing} = 20 °C	60 MPa
Zhu, 2013	Metakaolin	NaOH Na-silikat (Na ₂ O 8.29 wt%, SiO ₂ 29.91 wt%) H ₂ O 35% (SiO ₂ +Na ₂ O)	Aktivator larutan	Rasio berat SH/SS = 0.7 Rasio molar SiO ₂ :Na ₂ O = 1.2 Rasio molar H ₂ O/Na ₂ O = 15.2 W/C rasio = 0.32 T _{curing} = 20 ± 2 °C Ageing condition: SC – 80 °C sealed curing in plastic bags	80 MPa
Maragkos, 2009	FNS	NaOH Na-silikat (Na ₂ O = 8%, SiO ₂ = 27%, H ₂ O = 65% and d = 1.346 g/l)	Aktivator larutan	NaOH 7M SiO ₂ 4M Rasio S/L = 5.4 g/ml	120 MPa

Lampiran 2

Perhitungan Kebutuhan Aluminium Hidroksida, $\text{Al}(\text{OH})_3$

Diketahui:

Massa slag	= 850 gram
[NaOH]	= 7 Molar
Rasio <i>solid/liquid</i> (S/L)	= 5,4 gr/mL
Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	= 2,5
Komposisi Na_2SiO_3	= (SiO_2 = 27%, Na_2O = 8%, dan H_2O = 65%)
Rasio Si/Al	= 1,5
% SiO_2 dalam slag	= 43,08%
% Al_2O_3 dalam slag	= 9,13%

- Menentukan volume larutan aktivator

$$\frac{\text{massa slag}}{\text{volume larutan aktivator}} = \frac{S}{L} = 5,4 \text{ gr/mL}$$

$$L = \frac{S}{5,4 \text{ gr/mL}}$$

$$= \frac{850 \text{ gr}}{5,4 \text{ gr/mL}}$$

$$= 157,41 \text{ mL}$$

Jadi volume larutan aktivator yang diperlukan adalah 154,41 mL

- Menentukan volume NaOH 7 molar dan volume Na_2SiO_3

$$\text{Rasio volume } \frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 2,5$$

Jika, volume Na_2SiO_3 dan NaOH masing-masing dilambangkan dengan a dan b, maka:

$$\frac{a}{b} = 2,5; \text{ dimana } a + b = 157,41 \text{ mL} \Rightarrow a = 157,41 \text{ mL} - b$$

Sehingga,

$$\frac{157,41 \text{ mL} - b}{b} = 2,5 \Rightarrow 157,41 \text{ mL} - b = 2,5b \Rightarrow 157,41 \text{ mL} = 3,5b$$

$$b = \frac{157,41 \text{ mL}}{3,5} = 44,97 \text{ mL}$$

Substitusi nilai b = 44,97 mL ke persamaan:

$$a = 157,41 \text{ mL} - b = 157,41 \text{ mL} - 44,97 \text{ mL} = 112,43 \text{ mL}$$

Jadi, volume NaOH 7 molar dan Na_2SiO_3 masing-masing adalah 44,97 dan 112,43 mL.

- Menentukan massa Si dalam slag

$$\text{Massa SiO}_2 \text{ dalam slag} = \frac{\% \text{ SiO}_2 \text{ dalam slag}}{100} \times \text{massa slag}$$

$$= \frac{43,08}{100} \times 850 \text{ gr} = 366,18 \text{ gr}$$

$$\text{Massa Si} = \frac{\text{Ar Si}}{\text{Mr SiO}_2} \times \text{massa SiO}_2$$

$$= \frac{28,1}{60,1} \times 366,18 \text{ gr} = 171,21 \text{ gr}$$

4. Menentukan massa Al dalam slag

$$\begin{aligned} \text{Massa } Al_2O_3 \text{ dalam slag} &= \frac{\% Al_2O_3 \text{ dalam slag}}{100} \times \text{massa slag} \\ &= \frac{9,13}{100} \times 850 \text{ gr} \\ &= 77,61 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa Al} &= \frac{2 \times Ar \text{ Al}}{Mr Al_2O_3} \times \text{massa } Al_2O_3 \\ &= \frac{54}{102} \times 77,61 \text{ gr} \\ &= 41,91 \text{ gr} \end{aligned}$$

5. Menentukan massa $Al(OH)_3$ yang diperlukan

- a. Untuk rasio $Si/Al = 1,5$

$$\begin{aligned} \frac{Si}{Al} = 1,5 &\Rightarrow \frac{\text{Massa Si dalam slag}}{\text{Massa Al dalam slag} + \text{Massa Al dalam } Al(OH)_3} = 1,5 \\ \text{Massa Al dalam } Al(OH)_3 &= \frac{\text{Massa Si dalam slag} - 1,5 \times \text{Massa Al dalam slag}}{1,5} \\ &= \frac{171,21 \text{ gr} - 1,5 \times 41,91 \text{ gr}}{1,5} \\ &= \frac{171,21 \text{ gr} - 62,87 \text{ gr}}{1,5} \\ &= \frac{108,34 \text{ gr}}{1,5} \\ &= 73,05 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa } Al(OH)_3 &= \frac{Mr Al(OH)_3}{Ar Al} \times \text{Massa Al} \\ &= \frac{78}{27} \times 73,05 \text{ gr} \\ &= 211,13 \text{ gr} \end{aligned}$$

- b. Untuk rasio $Si/Al = 2$

$$\begin{aligned} \frac{Si}{Al} = 2 &\Rightarrow \frac{\text{Massa Si dalam slag}}{\text{Massa Al dalam slag} + \text{Massa Al dalam } Al(OH)_3} = 2 \\ \text{Massa Al dalam } Al(OH)_3 &= \frac{\text{Massa Si dalam slag} - 2 \times \text{Massa Al dalam slag}}{2} \\ &= \frac{171,21 \text{ gr} - 2 \times 41,91 \text{ gr}}{2} \\ &= \frac{171,21 \text{ gr} - 83,82 \text{ gr}}{2} \\ &= \frac{87,39 \text{ gr}}{2} \\ &= 44,52 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Al(OH)}_3 &= \frac{\text{Mr Al(OH)}_3}{\text{Ar Al}} \times \text{Massa Al} \\
 &= \frac{78}{27} \times 44,52 \text{ gr} \\
 &= 128,67 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

c. Untuk rasio Si/Al = 2,5

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{Si}}{\text{Al}} = 2,5 &\Rightarrow \frac{\text{Massa Si dalam slag}}{\text{Massa Al dalam slag} + \text{Massa Al dalam Al(OH)}_3} = 2,5 \\
 \text{Massa Al dalam Al(OH)}_3 &= \frac{\text{Massa Si dalam slag} - 2,5 \times \text{Massa Al dalam slag}}{2,5} \\
 &= \frac{171,21 \text{ gr} - 2,5 \times 41,91 \text{ gr}}{2,5} \\
 &= \frac{171,21 \text{ gr} - 104,78 \text{ gr}}{2,5} \\
 &= \frac{66,43 \text{ gr}}{2,5} \\
 &= 27,40 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Al(OH)}_3 &= \frac{\text{Mr Al(OH)}_3}{\text{Ar Al}} \times \text{Massa Al} \\
 &= \frac{78}{27} \times 27,40 \text{ gr} \\
 &= 79,19 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

d. Untuk rasio Si/Al = 3

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{Si}}{\text{Al}} = 3 &\Rightarrow \frac{\text{Massa Si dalam slag}}{\text{Massa Al dalam slag} + \text{Massa Al dalam Al(OH)}_3} = 3 \\
 \text{Massa Al dalam Al(OH)}_3 &= \frac{\text{Massa Si dalam slag} - 3 \times \text{Massa Al dalam slag}}{3} \\
 &= \frac{171,21 \text{ gr} - 3 \times 41,91 \text{ gr}}{3} \\
 &= \frac{171,21 \text{ gr} - 125,73 \text{ gr}}{3} \\
 &= \frac{45,48 \text{ gr}}{3} \\
 &= 15,99 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa Al(OH)}_3 &= \frac{\text{Mr Al(OH)}_3}{\text{Ar Al}} \times \text{Massa Al} \\
 &= \frac{78}{27} \times 15,99 \text{ gr} \\
 &= 46,21 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

e. Untuk rasio Si/Al = 3,5

$$\frac{\text{Si}}{\text{Al}} = 3,5 \Rightarrow \frac{\text{Massa Si dalam slag}}{\text{Massa Al dalam slag} + \text{Massa Al dalam Al(OH)}_3} = 3,5$$

$$\begin{aligned}
& \text{Massa Al dalam Al(OH)}_3 \\
&= \frac{\text{Massa Si dalam slag} - 3,5 \times \text{Massa Al dalam slag}}{3,5} \\
&= \frac{171,21 \text{ gr} - 3,5 \times 41,91 \text{ gr}}{3,5} \\
&= \frac{171,21 \text{ gr} - 146,69 \text{ gr}}{3,5} \\
&= \frac{24,52 \text{ gr}}{3,5} \\
&= 7,84 \text{ gr} \\
& \text{Massa Al(OH)}_3 = \frac{\text{Mr Al(OH)}_3}{\text{Ar Al}} \times \text{Massa Al} \\
&= \frac{78}{27} \times 7,84 \text{ gr} \\
&= 22,65 \text{ gr}
\end{aligned}$$

Data Hasil Perhitungan Kebutuhan Al(OH)₃

Rasio Si/Al	Massa Slag	% SiO ₂ dalam slag	% Al ₂ O ₃ dalam slag	Massa SiO ₂	Massa Al ₂ O ₃	Massa Al dalam		Massa Al(OH) ₃
						Slag	Al(OH) ₃	
1.50	850.00	43.08	9.13	366.18	77.61	41.07	73.05	211.13
2.00	850.00	43.08	9.13	366.18	77.61	41.07	44.52	128.67
2.50	850.00	43.08	9.13	366.18	77.61	41.07	27.40	79.19
3.00	850.00	43.08	9.13	366.18	77.61	41.07	15.99	46.21
3.50	850.00	43.08	9.13	366.18	77.61	41.07	7.84	22.65

Lampiran 3

Perhitungan Kebutuhan Larutan Aktivator

Diketahui:

Massa slag = 850 gram (a)

Rasio S/L = 5,4 gr/mL (b)

Volume Na_2SiO_3 (c)

Volume NaOH (d)

Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ = 2,5 (e)

dimana S adalah massa slag (a) dan L adalah volume larutan aktivator (c + d)

Persamaan yang digunakan antara lain:

$$\begin{aligned}\text{Rasio } S/L \text{ (b)} &= \frac{a}{c + d} \\ 5,4 &= \frac{850}{c + d} \Rightarrow c + d = \frac{850}{5,4} \\ &= 157,4\end{aligned}$$

$$c + d = 157,4 \Rightarrow c = 157,4 - d \quad (\text{persamaan 1})$$

$$e = c/d = 2,5 \quad (\text{persamaan 2})$$

a. Menentukan volume NaOH

$$\begin{aligned}\frac{c}{d} &= \frac{157,4 - d}{d} = 2,5 \Rightarrow 157,4 - d = 2,5d \\ 157,4 &= 2,5d + d \\ 157,4 &= 3,5d \\ d &= \frac{157,4}{3,5} \\ &= 44,97\end{aligned}$$

Dengan demikian volume NaOH yang digunakan adalah 44,97 mL

b. Menentukan volume Na_2SiO_3

Substitusikan volume NaOH = 44,97 mL

$$\begin{aligned}c &= 157,4 - d \\ &= 157,4 - 45 \\ &= 112,4\end{aligned}$$

Volume Na_2SiO_3 yang digunakan untuk membuat larutan aktivator adalah 112,4 mL.

Lampiran 4

Perhitungan Pengujian Penyerapan Air

Penyerapan air dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$A_T = \frac{(W_T - W_0) \times 10000}{(L_1 \times L_2)}$$

Untuk Sampel A1

Diketahui:

$$\begin{aligned} W_0 &= 267,80 \text{ gram} \\ \text{Luasan} &= 2662,20 \text{ mm}^2 \\ W_{0,25} &= 273,50 \text{ gram} \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$A_{T0,25} = \frac{(273,50 - 267,80) \times 10000}{(2662,20)} = \frac{5,7 \times 10000}{2662,20} = 21,41 \text{ gr/100 cm}^2$$

Dengan cara yang sama diperoleh data sebagaimana disajikan pada tabel di bawah ini.

Kode Sampel	Massa Sampel (gr)					AT (gr/100 cm ²)				Luasan (mm ²)
	W ₀	W _{0,25}	W ₁	W ₄	W ₂₄	AT _{0,2} ₅	AT ₁	AT ₄	AT ₂₄	
A1	267,80	273,50	280,00	289,50	291,00	21,41	45,83	81,51	87,15	2662,20
A2	257,40	264,90	273,30	279,50	280,60	29,18	61,86	85,98	90,26	2570,24
A3	259,40	267,70	275,40	281,00	282,10	32,29	62,25	84,03	88,31	2570,40
Rata-rata	261,53	268,70	276,23	283,33	284,57	27,63	56,65	83,84	88,57	2600,95
B1	269,10	277,00	284,40	290,90	292,00	30,55	59,18	84,32	88,57	2585,52
B2	266,60	272,80	277,80	284,80	287,50	23,94	43,24	70,26	80,69	2590,32
B3	265,30	271,60	277,40	284,50	286,10	24,51	47,08	74,70	80,92	2570,33
Rata-rata	267,00	273,80	279,87	286,73	288,53	26,33	49,83	76,43	83,39	2582,06
C1	271,80	280,80	289,70	294,10	294,70	35,22	70,05	87,27	89,62	2555,24
C2	276,70	287,10	295,90	300,20	301,00	40,22	74,26	90,89	93,98	2585,66
C3	272,10	279,60	288,60	295,30	296,30	29,29	64,44	90,61	94,52	2560,36
Rata-rata	273,53	282,50	291,40	296,53	297,33	34,91	69,58	89,59	92,71	2567,09
D1	280,70	291,10	302,10	304,10	305,10	39,29	80,84	88,40	92,18	2647,10
D2	275,10	286,00	295,60	298,00	298,70	40,86	76,85	85,84	88,47	2667,70
D3	278,30	289,20	299,90	301,70	302,60	41,10	81,45	88,24	91,63	2652,00
Rata-rata	278,03	288,77	299,20	301,27	302,13	40,42	79,71	87,49	90,76	2655,60
E1	277,20	287,90	296,10	297,30	298,10	41,14	72,66	77,28	80,35	2601,00
E2	280,90	291,50	300,10	302,20	303,10	41,40	74,99	83,20	86,71	2560,20
E3	286,70	297,00	305,20	306,60	307,20	39,21	70,43	75,76	78,05	2626,56
Rata-rata	281,60	292,13	300,47	302,03	302,80	40,59	72,70	78,75	81,70	2595,92
W ₀ = Berat benda uji kering										
WT = Berat benda uji setelah perendaman										

Lampiran 5

Perhitungan Standar Deviasi Pengujian Kuat Tekan

Perhitungan standar deviasi (SD) dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

dimana:

SD = standar deviasi

x_i = data kuat tekan untuk tiap benda uji ($x_1, x_2, x_3,$)

\bar{x} = data kuat tekan rata-rata benda uji

n = jumlah pengujian

Sampel	Pengujian			\bar{x}
	x_1	x_2	x_3	
A	9,95615	10,6124	9,77492	10,1145
B	8,77495	7,175	8,09996	8,01663
C	10,0374	11,3687	10,2562	10,5541
D	9,2812	10,1499	9,74878	9,72664
E	11,5562	11,2375	14,8499	12,5479

Untuk sampel A

$$\begin{aligned}
 SD &= \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \\
 &= \sqrt{\frac{((9,95615 - 10,1145)^2 + (10,6124 - 10,1145)^2 + (9,77492 - 10,1145)^2)}{3 - 1}} \\
 &= \sqrt{\frac{((-0,15835)^2 + 0,4979^2 + (-0,33958)^2)}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{(0,0250747225 + 0,24790441 + 0,1153145764)}{2}} \\
 &= \sqrt{\frac{0,3882937089}{2}} \\
 &= \sqrt{0,19414685445} \\
 &= 0,44062
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama diperoleh data sebagaimana disajikan pada tabel berikut.

Sampel	Pengujian			Rata-rata	SD
	I	II	III		
A	9,95615	10,6124	9,77492	10,1145	0,44062
B	8,77495	7,175	8,09996	8,01663	0,80322
C	10,0374	11,3687	10,2562	10,5541	0,71386
D	9,2812	10,1499	9,74878	9,72664	0,4348
E	11,5562	11,2375	14,8499	12,5479	2,00001

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sifat penyerapan air dan kuat tekan bergantung pada jenis aluminat dan silikat penyusun geopolimer. Meningkatnya rasio Si/Al mengarah pada pembentukan geopolimer yang lebih homogen sehingga meningkatkan kuat tekan dan cenderung penyerapan air mengalami penurunan. Kondisi optimum dicapai ketika semen geopolimer memiliki kuat tekan tinggi dan penyerapan air rendah yaitu pada rasio Si/Al = 3,5, dimana kuat tekan dan penyerapan air (setelah 24 jam perendaman) masing-masing adalah 12,6 MPa dan 81,7 gr/100 cm².

5.2 Saran

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini belum sepenuhnya optimal. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian lanjutan untuk mengembangkan sifat fisik-mekanik material geopolimer sebagai alternatif semen. Beberapa hal yang penulis sarankan untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut antara lain:

1. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan memvariasikan penekanan pada saat pencetakan pasta dan lamanya pencetakan sebelum dilakukan pemanasan pada suhu tertentu.
2. Sifat mekanik (kuat tekan) bergantung pada pembentukan monomer silikat berupa $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ dan $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ dimana struktur $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ lebih stabil dibandingkan struktur $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$. Oleh karena itu, perlu ada penelitian lanjutan guna mengkaji kaitan antara kekuatan ikatan dengan kestabilan monomer silikat dalam pembentukan struktur geopolimer yang lebih kompleks.
3. Hasil yang diperoleh dapat diaplikasikan dengan memenuhi persyaratan-persyaratan berkaitan dengan penyerapan air dan kuat tekannya. Dengan kata lain, material geopolimer yang dihasilkan tidak dapat diterapkan pada kondisi-kondisi yang kadar air tinggi dan beban di atas 12 MPa.

~halaman ini sengaja dikosongkan~

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Gawwad, H.A. dan Abo-el-Enein, S.A. (2014), "A Novel Method to Produce Dry Geopolymer Cement Powder", *Housing and Building National Research Center*, hal. 1-12.
- Abdel Rahman, A., Abo-El-Enein, S.A., Aboul-Fetouh, M., dan Shehata, Kh. (2011), "Characteristics of Portland blast-furnace Slag Cement Containing Cement Kiln Dust and Active Silica", *Arabian Journal of Chemistry*, hal. 1-6.
- Abdullah, M.M.A., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K.N., dan Ibrahim, W.M.W. (2011), "Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement – A Review", *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, Vol. 6, No. 1, hal. 35-44.
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., dan Zhang, L. (2012), "Production of Geopolymeric Binder from Blended Waste Concrete Powder and Fly Ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, hal. 718-729.
- Alex, T.C., Kalinkin, A.M., Nath, S.K., Gurevich, B.I., Kalinkina, E.V., Tykavkina, V.V., dan Kumar, S. (2013), "Utilization of Zinc Slag Through Geopolymerization: Influence of Milling Atmosphere", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 123, hal. 102-107.
- ASTM C 109 / C 109M (2008), *Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM Committee C01 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.27 on Strength.
- ASTM C 1403 (2000), *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*. ASTM Committee C12 on Mortars and Grouts for Unit Masonry and is the direct responsibility of Subcommittee C12.02 on Research and Methods of Test.
- Atiş, C.D., Görür, E.B., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., dan Luga, E. (2015), "Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated at Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration", *Construction and Building Materials*, Vol. 96, hal. 673-678.
- Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H. dan Si-yu, G. (2014), "Effect of Curing Temperature on Geopolymerization of Metakaolin-based Geopolymer", *Applied Clay Science*, Vol. 99, hal. 144-148.
- Biro Perencanaan Kementerian Perindustrian, (2012). *Analisis Biaya Manfaat Pelarangan Ekspor Bahan Mentah Minerba dan Dampaknya Terhadap Sektor Industri: Studi Kasus Nikel dan Tembaga*, Kementerian Perindustrian RI, Jakarta.
- Brandon, D dan Kaplan, W.D., (2008), *Microstructural Characterization of Materials*, 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd, England.
- Burns, R.G., (1993), *Mineralogical Applications of Crystal Field Theory*, 2nd edition, Cambridge University Press, New York.

- Chanh, N.V., Trung, B.D., dan Tuan, D.V. (2008), "Recent Research Geopolymer Concrete" The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA. University of Technology HCM City, Vietnam, hal. 236.
- Chithiraputhiran, S. R. (2012), *Kinetics of Alkaline Activation of Slag and Fly Ash-Slag Systems*, A Thesis presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science, Arizona State University, Tempe, United States.
- Choi, Y.C., dan Choi, S., (2015), "Alkali-silica Reactivity of Cementitious Materials Using Ferro-nickel Slag Fine Aggregates Produced in Different Cooling Conditions", *Construction and Building Materials*, Vol. 99, Hal. 279-287.
- Cooke, J. (2005), *Spectroscopy in Inorganic Chemistry*, Departement of Chemistry, University of Alberta.
- Cwirzen, A., Provis, J.L., Penttala, V., dan Habermehl-Cwirzen, K. (2014), "The Effect of Limestone on Sodium Hydroxide-Activated Metakaolin-based Geopolymers", Vol. 66, hal. 53-62.
- Davidovits, J. (1994), "Properties of Geopolymer Cements", *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Scientific Resesarch Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine.
- Davidovits, J. (2011), *Geopolimer Chemistry and Aplications*, 3rd edition, Institute Géopolymère, Saint-Quentin, France.
- Deb, P.S., Nath, P., dan Sarker, P.K. (2014), "The Effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on the Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature", *Materials and Design*, Vol. 62, hal. 32-39.
- Demotica, J.S., Amparado Jr, R.F., Malaluan, R.M., dan Demayo, C.G. (2012), "Caharacterization and Leaching Assessment of Ferronickel Slag from a Smelting Plant in Iligan City, Philipines", *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 3, No. 5, hal. 470-474.
- Deolalkar, S.P. (2009), *Handbook for Designing Cement Plants*, BS Publications, Hyderabad.
- De Weerd, K. (2011), "Geopolymers – State of the Art", *COIN Project Report 37*, SINTEF Building and Infrastructure.
- Dimas, D., Giannopoulou, I., dan Panias, D. (2009), "Polymerization in Sodium Silicate Solutions: A Fundamental Process in Geopolymerization Technology", *Journal of Material Science*, Vol. 44, hal. 3719-3730.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara. 2016. *Dukungan Penyediaan Bahan Baku untuk Pembangunan Industri Berbasis Minerba*, Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicot, S.W., Kriven, W.M., dan van Deventer, J.S.J. (2005), "Undestanding the Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties", *Colliods and Surfaces A: Physicochemistry Engineering Aspects*, Vol. 269, hal. 47-58.
- Duxson, P., Mallicot, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M., dan van Deventer, J.S.J. (2007a), "The Effect of Alakali and Si/Al Ratio on the Development of

- Mechanical Properties of Metakaolin-based Geopolymers”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemistry Engineering Aspects*, Vol. 292, hal. 8-20.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., dan van Deventer, J.S.J. (2007b), “Geopolymer Technology: The Current State of The Art”, *Journal of Material Science*, Vol. 42, hal. 2917-2933.
- Emery, J. (1984), “Steel Slag Utilization in Asphalt Mixes”, *Canadian Technical Asphalt Association Proceedings*, National Slag Association, Brampton, Ontario L6T 4V1, Canada.
- Escalante-Garcia, J.I., Castro-Borges, P., Gorokhovskiy, A., dan Rodriguez-Varela, F.J. (2014), “Portland Cement-blast Furnace Slag Mortars Activated Using Waterglass: Effect of Temperature and Alkali Concentration”, *Construction and Building Materials*, Vol. 66, hal. 323-328.
- Fansuri, H., Swastika, N., dan Atmaja, L. (2008), “Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton”, *Akta Kimindo*, Vol. 3, No. 2, hal. 61-66.
- Fathi, M.H dan Kharaziha, M. (2009), “The Effect of Fluorine Ion on Fabrication of Nanostructure During Mechanochemical Synthesis”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 472, Hal. 540-545.
- Firdaus, A. (2007), *Proses Pembuatan Semen pada PT. Holcim Indonesia tbk.*, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Agung Tirtayasa, Banten.
- Gharzouni, A., Vidal, L., Essaidi, N., Joussein, E., dan Rossignol, S. (2016), “Recycling of Geopolymer Waste: Influence on Geopolymer Formation and Mechanical Properties”, *Materials and Design*, Vol. 94, hal. 221-229.
- Giannopoulou, I., Dimas, D., Maragkos., dan Panias, D. (2009), “Utilization of Metallurgical Solid by-Products for the Development of Inorganic Polymeric Construction Materials”, *Global NEST Journal*, Vol. 11, No. 2, hal. 127-136.
- Görhan, G., dan Kürklü, G. (2014), “The Influence of the NaOH Solution on the Properties of the Fly Ash-based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures”, *Composites: Part B*, Vol. 58, hal. 371-377.
- Hajimohammadi, A., Provis, J.L., van Deventer, J.S.J. (2011), “Time-resolved and Spatially-resolved Infrared Spectroscopic Observation of Seeded Nucleation Controlling Geopolymer Gel Formation”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 357, hal. 384-392.
- Heath, A., Paine, K., dan McManus, M. (2014), “Minimising the Global Warming Potential of Clay Based Geopolymers”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 78, hal. 75-83.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Nicolas, R.S., Hamdan, S., dan van Deventer, J.S.J. (2014), “Modification of Phase Evolution in Alkali-Activated Blast Furnace Slag by the Incorporation of Fly Ash”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 45, hal. 125-135.
- Kamalian, R., Yazdanpanah, A., Moztarzadeh, F., Ravarian, R., Moztarzadeh, Z., Tahmasbi, M., dan Mozafari, M., (2012), “Synthesis and Characterization of Bioactive Glass/Forsterite Nanocomposites for Bone and Dental Implants”, *Ceramic-Silikaty*, Vol. 56, No. 4, Hal. 331-340.

- Karakoç, M.B., Türkmen, I., Maraş, M.M., Kantarci, F., Demirboğa, R. dan Toprak, M.U. (2014), "Mechanical Properties and Setting Time of Ferrochrome Slag Based Geopolymer Paste and Mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, hal. 283-292.
- Keltner, Ty dan Sonafrank, C. (2010), *Geopolymer Cement Can -and Should be Produced in Alaska*, Cold Climate Housing Research Center, Fairbanks.
- Kementerian ESDM, (2012), *Kajian Supply Demand Minerals*, Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Ken, P.W., Ramli, M., dan Ban, C.C. (2015), "An Overview on The Influence of Various Factors on The Properties of Geopolymer Concrete Derived from Industrial by-Products", *Construction and Building Materials*, Vol. 77, Hal. 370-395.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., dan Perdikatsis, V., (2007), "Geopolymerisation of Low Calcium Ferronickel Slags", *Journal of Material Science*, Vol. 42, Hal. 3073-3082.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., dan Bartzas, G., (2013), "Effect of Sulphate and Nitrate Anions on Heavy Metal Immobilisation in Ferronickel Slag Geopolymers", *Applied Clay Science*, Vol. 73, hal. 103-109.
- Kumar, S., Kumar, R., dan Mehrotra, S.P. (2010), "Influence of Granulated Blast Furnace Slag on the Reaction, Structure and Properties of Fly Ash Based Geopolymer", *Journal of Material Science*, Vol. 45, hal. 607-615.
- Kumar, S., Kristaly, F., dan Mucsi, G. (2015), "Geopolymerisation Behaviour of Size Fraction Fly Ash", *Advanced Powder Technology*, Vol. 26. Hal. 24-30.
- Kusumastuti, E. (2012), "Pemanfaatan Abu Vulkanik Gunung Merapi Sebagai Geopolimer (Suatu Polimer Anorganik Aluminosilikat)", *Jurnal MIPA*, Vol. 35. No. 1, hal. 66-76.
- Lampris, C., Lupo, R., dan Cheeseman, C.R. (2009), "Geopolymerisation of Silt generated from Construction and Demolition Waste Washing Plants", *Waste Management*, Vol. 29. Hal. 368-373.
- Lee, N.K. dan Lee, H.K. (2015), "Reactivity and Reaction Products of Alkali-activated, Fly Ash/Slag Paste", *Construction and Building Materials*, Vol. 81, hal. 303-312.
- Lemonis, N., Tsakiridis, P.E., Katsiotis, N.S., Antiohos, S., Papageorgiou, D., dan Katsiotis, M.S., dan Beazi-Katsioti, M. (2015), "Hydration Study of Ternary Blended Cements Containing Ferronickel Slag and Natural Pozzolan", *Construction and Building Materials*, Vol. 81, hal. 130-139.
- Lübeck, A., Gastaldini, A.L.G., Barin, D.S., dan Siqueira, H.C. (2012), "Compressive Strength and Electrical Properties of Concrete with White Portland Cement and Blast-furnace Slag", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, hal. 392-399.
- Maragkos, I., Giannopoulou, I.P. dan D. Panias. (2009), "Synthesis of Ferronickel Slag-based Geopolymers", *Minerals Engineering*, Vol. 22, hal. 196-203.
- Martin, A., J.Y. Pastor, A. Palomo, dan F.A. Jiménez. (2015), "Mechanical Behaviour at High Temperature of Alkali-Activated Aluminosilicates (Geopolymers)", *Construction and Building Materials*, Vol. 93, hal. 1188-1195.

- Meng, T.Y., Yong, T.C., Singh, R., dan Ching, T.Y., (2015), "The Effect of Heat Treatment Time on the Formation of Forsterite", *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*, Vol. 4, No. 2, Hal. 104-107.
- Mihailova, I. dan Mehandjiev, D., (2010), "Characterization of Fayalite from Copper Slags", *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, Vol. 45, Hal. 317-326.
- Mijarsh, M.J.A., Johari, M.A.M., dan Ahmad, Z.A. (2015), "Effect of Delay Time and Na_2SiO_3 Concentrations on Compressive Strength Development of Geopolymer Mortar Synthesized from TPOFA", *Construction and Building Materials*, Vol. 86, hal. 64-74.
- Mo, L., Liu, M., Al-Tabbaa, A., Deng, M., dan Lau, W.Y. (2015), "Deformation and Mechanical Properties of Quarternary Blended Cements Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash and Magnesia", *Cement and Concrete Research*, Vol. 71, hal. 7-13.
- Muduli, S.D., Sadangi, J.K., Nayak, B.D., dan Mishra, B.K. (2013), "Effect of NaOH Concentration in Manufacture of Geopolymer Fly Ash Building Brick", *Greener Journal of Physical Sciences*, Vol. 3, No. 6, hal. 204-211.
- Naghuiu, M.A., Gorea, M., Mutch, E., Kristaly, E., dan Tomoaia-Cotisel, M., (2013), "Forsterite Nanopowder: Structural Characterization and Biocompatibility Evaluation", *Journal of Material Science and Technology*, Vol. 29, Hal. 628-632.
- Nath, S.K. dan Kumar, S. (2013), "Influence of Iron Making Slags on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol. 38, hal. 924-930.
- Nath, S.K., Maitra, S., Mukherjee, S., dan Kumar, S. (2016), "Microstructural and Morphological Evolution of Fly Ash Based Geopolymers", *Construction and Building Materials*, Vol. 111, hal. 758-765.
- Nikolić, V., Komljenović, M., Baščarević, Z., Marjanović, N., Miladinović, Z., dan Petrović, R. (2015), "The Influence of Fly Ash Characteristics and Reaction Conditions on Strength and Structure of Geopolymers", *Construction and Building Materials*, Vol. 94, hal. 361-370.
- Ogundiran, M.B. dan Kumar, S. (2015), "Synthesis and Characterisation of Geopolymer from Nigerian Clay", *Applied Clay Science*, Vol. 108, hal. 173-181.
- Onisei, S., Pontikes, Y., Van Gerven, T., Angelopoulos, G.N., Velea, T., Predica, V., dan Moldovan, P. (2012), "Synthesis of Inorganic Polymers Using Fly Ash and Primary Lead Slag", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 205-206, hal. 101-110.
- Ozer, I. dan Soyer-Uzun, S. (2015), "Relations Between the Structural Characteristics and Compressive Strength in Metakaolin Based Geopolymers with Different Molar Si/Al Ratios", *Ceramics International*, Vol. 41, hal. 10192-10198.
- Palomo, A. dan Fernández-Jiménez, A. (2011), "Alkaline Activation, Procedure for Transformation Fly Ash into New Materials. Part I: Applications", *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Denver, CO, USA.

- Panias, D., Giannopoulou, I., dan Perraki, T. (2007), "Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymers", *Colloids and Surfaces*, Vol. 301, hal. 246-254.
- Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., dan Hatanaka, S. (2014), "The Effect of Adding Nano-SiO₂ and Nano-Al₂O₃ on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature", *Materials and Design*, Vol. 55, hal. 58-65.
- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., dan Chindaprasirt, P. (2015), "Effects of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Solutions on Compressive and Shear Bond Strengths of FA-GBFS Geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol. 91, hal. 1-8.
- Puertas, F dan Fernandez-Jimenez, A. (2003), "Mineralogical and Microstructural Characterisation of Alkali-activated Fly Ash/Slag Pastes", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, hal. 287-292.
- Rickard, W.D.A., Borstel, C.D., dan van Riessen, A. (2013), "The Effect of Pre-treatment on the Thermal Performance of Fly Ash Geopolymers", *Thermochimica Acta*, Vol. 573, hal. 130-137.
- Risdiyanto, R. (2013), Kajian Kuat Tekan Beton dengan Perbandingan Volume dan Perbandingan Berat untuk Produksi Beton Massa Menggunakan Agregat Kasar Batu Pecah Merapi, *Jurnal Teknik Sipil*, UNY.
- Saddat, M.R., Bringuier, S., Muralidharan, K., Runge, K., Asaduzzaman, A., dan Zhang, L. (2016), "An Atomistic Characterization of the Interplay Between Composition, Structure and Mechanical Properties of Amorphous Geopolymer Binders", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 434, hal. 53-61.
- Sakkas, K., Panias, D., Nomikos, P.P., dan Sofianos, A.I. (2014), "Potassium Based Geopolymer for Passive Fire Protection of Concrete Tunnels Linings", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 43, hal. 148-156.
- Saraya, M.E.I. (2014), "Study Physico-chemical Properties of Blended Cements Containing Fixed Amount of Silica Fume, Blast Furnace Slag, Basalt and Limestone, a Comparative Study", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, hal. 104-112.
- Sato, T., Watanabe, K., Ota, A., Aba, M., dan Sakoi, Y. (2011), "Influence of Excessive Bleeding on Frost Susceptibility of Concrete Incorporating Ferronickel Slag as Aggregates", *36th Conference on Our World in Concrete & Structures*, Singapore.
- Selmani, S., Essaidi, N., Gouny, F., Bouaziz, S., Josseim, E., Driss, A., Sdiri, A., dan Rossignol, S. (2015), "Physical-Chemical Characterization of Tunisian Clays for the Synthesis of Geopolymers Materials", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 103, hal. 113-120.
- Smith, B.C. (2011), *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, 2nd Edition, Taylor & Francis Group, LLC., New York.
- Sonafrank, G.H.C. (2010), *Investigating 21st Century Cement Production in Interior Alaska Using Alaskan Resources*, Cold Climate Housing Research Center, Fairbanks.

- Sugiri, S., Soemardi, B.W., Sutha, G.P., dan Louis. (2005), "Penggunaan Terak Nikel sebagai Agregat Beton Pemberat Pipa Gas Lepas Pantai", *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 12, No. 4, hal. 241-248.
- Susilowati, D. (2013), *Pengaruh Penggunaan Terak Sebagai Pengganti Agregat Kasar Terhadap Kuat Lentur dan Berat Jenis Beton Normal dengan Metode Mix Design*, Skripsi, Universitas Negeri Surakarta, Surakarta.
- Tennakoon, C., Shayan, A., Sagoe-Crentsil, K., dan Sanjayan, J.G. (2014), "Importance of Reactive SiO_2 , Al_2O_3 and Na_2O in Geopolymer Formation", *9th Austroads Bridge Conference*, Sydney, New South Wales, hal. 1-12.
- Vignes, A., (2011), *Extractive Metallurgy I*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- Von Krüger, P., Silva, C.A., Viera, C.B., Araújo, F.G.S., dan Seshadri, V. (2010), "Relevant Aspects Related to Production of Iron Nickel Alloys (Pig Iron Containing Nickel) in Mini Blast Furnaces", *12th International Ferroalloys Congress Sustainable Future*, Hal. 671-680, Helsinki, Finland.
- Wang, G. dan J. Emery. (2004), "Technology of Slag Utilization in Highway Construction", *Paper prepared for Presentation at the Environmental Benefits of In-situ Material Recycling and Strengthening Session, Annual Conference, Transportation Association of Canada*, Québec City, Québec.
- Wang, G., Thompson, R.G., dan Wang, Y., (2011), "Hot-Mix Asphalt That Contains Nickel Slag Aggregate", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2208, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., hal. 1-8.
- Webster, J.R., Kight, R.P., Winburn, R.S., dan Cool, C.A., (2003), "Heavy Mineral Analysis of Sandstones by Rietveld Analysis", *International Centre for Diffraction Data*, Vol. 46, Hal. 198-203.
- Weng, L. dan Sagoe-Crentsil, K. (2007), "Dissolution Processes, Hydrolisis and Condensation Reactions During Geopolymer Synthesis: Part I-Low Si/Al Ratio Systems", *Journal of Material Science*, Vol. 42, hal. 2997-3006.
- Yang, T., Yao, X., dan Zhang, Z. (2014), "Geopolymer Prepared with High-magnesium Nickel Slag: Characterization of Properties and Microstructure", *Construction and Building Materials*, Vol. 59, hal. 188-194.
- Yip, C.K., Lukey, G.C., Provis, J.L., dan van Deventer, J.S.J (2008), "Effect of Calcium Silicate Sourecs on Geopolymerisation", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, hal. 554-564.
- Zaharaki, D. and Komnitsas, K. (2009), "Effect of Additives on the Compressive Strength of Slag-Based Inorganic Polymers", *Global NEST Journal*, Vol. 11, No. 2, hal. 137-146.
- Zhang, Z., Wang, H., Provis, J.L., Bullen, F., Reid, A., dan Zhu, Y. (2012), "Quantitative Kinetic and Structural Analysis of Geopolymers. Part 1. The Activation of Metakaolin with Sodium Hidroksida", *Thermochemica Acta*, Vol. 539, hal. 23-33.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Wang, H., Bullen F., dan Reid, A. (2013), "Quantitative Kinetic and Structural Analysis of Geopolymers. Part 2. Thermodynamics of Sodium Silicate Activation of Metakaolin", *Thermochemica Acta*, Vol. 565, hal. 163-171.

- Zhang, H.Y., Kodur, V., Qi, S.L., dan Wu, B. (2015), "Characterizing the Bond Strength of Geopolymers at Ambient and Elevated Temperatures", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 58, hal. 40-49.
- Zhu, H., Zhang, Z., Deng, F., dan Cao, Y., (2013), "The Effects of Phase Changes on the Bonding Property of Geopolymer to Hydrate Cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 48, hal. 124-130.



Mustofa, lahir pada tanggal 23 April 1988 di Desa Bumirestu Kecamatan Wasile, Kabupaten Halmahera Timur, Maluku Utara. Penulis menempuh jenjang pendidikan Sekolah Dasar di SD Inpres Unit 1A Bumirestu dan selesai pada tahun 2001. Kemudian melanjutkan studinya di SMP Muhammadiyah Subaim dan lulus pada tahun 2004. Setelah lulus dari SMP Muhammadiyah Subaim, penulis melanjutkan studi ke SMA Muhammadiyah Terpadu. Setelah itu, penulis melanjutkan studi ke Universitas Negeri Gorontalo untuk menempuh gelar sarjananya dengan mengambil Jurusan Pendidikan Kimia. Setelah menyelesaikan studi S1 tahun 2011, penulis mengikuti beasiswa BPPDN Calon Dosen 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) dengan mengikuti pendidikan Pra S2 Fisika di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) selama 1 tahun. Selanjutnya mulai melanjutkan studi S2 tahun 2014 di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Penulis bergabung di Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material dan melakukan penelitian tesis tentang Pengaruh Rasio Si/Al terhadap Sifat Fisik-Mekanik Semen Geopolimer Berbasis Terak Feronikel. Penelitian ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Magister Teknik (M.T).

Email : muschemistry@yahoo.com

HP : 082195027610